

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Школа Инженерная школа энергетики

Направление подготовки 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Отделение школы НОЦ И.Н. Бутакова

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Тема работы
<b>Автоматизированная система подготовки и сжигания топлива в двигательной установке с микро-взрывной фрагментацией капель топлив</b>

УДК 004.896:66.041:629.3/.4

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ82	Антонов Дмитрий Владимирович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ИШЭ	Стрижак Павел Александрович	д.ф.- м.н., профессор		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Спицына Любовь Юрьевна	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ООД ШБИП	Романова Светлана Владимировна			

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ИШЭ	Стрижак Павел Александрович	д.ф.- м.н., профессор		

Томск – 2020 г.

**Запланированные результаты обучения выпускника образовательной программы магистратуры по направлению 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»**

<b>Код</b>	<b>Результат обучения</b>
<i>расчетно-проектная и проектно-конструкторская деятельность:</i>	
P1	Использовать глубокие естественнонаучные, математические и инженерные знания при предварительном анализе, проектировании, синтезе, ресурсоэффективной эксплуатации автоматизированных и автоматических систем управления теплоэнергетическими процессами, а также систем теплотехнических измерений и регистрации
P2	Разрабатывать комплекты проектной, конструкторской и эксплуатационной документации для сложных систем теплотехнических измерений и управления
<i>производственно-технологическая деятельность:</i>	
P3	Интегрировать знания различных областей для разработки мероприятий по совершенствованию технологии производства, обеспечению экономичности, надежности и безопасности эксплуатации, ремонта и модернизации энергетического, теплотехнического и теплотехнологического оборудования
P4	Применять и совершенствовать фундаментальные и прикладные знания по современным динамично изменяющимся теплоэнергетическим технологиям, принципам, методам и системам их управления для прорывных научно-исследовательских работ
P5	Применять знания нетехнических ограничений инженерной деятельности, разрабатывать мероприятия по безопасности жизнедеятельности персонала и населения, предотвращать экологические нарушения
<i>научно-исследовательская деятельность:</i>	
P6	Проводить теоретические и экспериментальные научные исследования термодинамических и физико-химических процессов в теплоэнергетике, а также систем их контроля и управления, интерпретировать, давать практические рекомендации по внедрению результатов исследований в производство, критически их интерпретировать, публично представлять и обсуждать результаты научных исследований
<i>организационно-управленческая деятельность:</i>	
P7	Руководить коллективом специалистов различных направлений и квалификаций, действовать в нестандартных ситуациях, принимать организационно-управленческие решения и нести за них ответственность при организации работ, разрабатывать мероприятия по предотвращению экологических нарушений
<i>педагогическая деятельность:</i>	
P8	Осуществлять педагогическую деятельность в области профессиональной подготовки
<i>Универсальные компетенции</i>	
P9	Мыслить абстрактно, обобщать, анализировать, систематизировать и прогнозировать, принимать решения в сложных инженерных задачах с технической неопределенностью и недостатком информации
P10	Использовать творческий потенциал, саморазвиваться, самореализовываться
P11	Использовать иностранный язык для эффективного взаимодействия в профессиональной сфере

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа Инженерная школа энергетики  
Направление подготовки 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника  
Отделение школы (НОЦ) НОЦ И.Н. Бутакова

УТВЕРЖДАЮ:  
Руководитель ООП  
\_\_\_\_\_ П.А. Стрижак

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

магистерской диссертации
--------------------------

Студенту:

Группа	ФИО
5БМ82	Антонову Дмитрию Владимировичу

Тема работы:

Автоматизированная система подготовки и сжигания топлива в двигательной установке с микро-взрывной фрагментацией капель топлив	
Утверждена приказом директора № 135-42/с	14.05.2020

Срок сдачи студентом выполненной работы:	30.05.2019
--	------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

Исходные данные к работе	В рамках ВКР разрабатывается комплект проектной и конструкторской документации, а также программные алгоритмы и мнемосхемы для АСУ процессом подготовки и сжигания топлива в двигательной установке с микро-взрывной фрагментацией капель топлив. Результаты научных исследований используются для оптимизации процессов вторичного измельчения капель топлив.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Исследовательские изыскания.</li> <li>2. Системный анализ объекта автоматизации.</li> <li>3. Разработка структуры КТС автоматизированной системы управления.</li> <li>4. Разработка документации АСУ подготовки и сжигания топлива в двигательной установке с микро-взрывной фрагментацией капель топлив.</li> <li>5. Расчет параметров настройки регулятора.</li> <li>6. Разработка мнемосхем SCADA-системы для АСУ подготовки и сжигания топлива в двигательной</li> </ol>

	<p>установке с микро-взрывной фрагментацией капель топлива.</p> <p>7. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.</p> <p>8. Социальная ответственность.</p>
Перечень графического материала	<p>1. Схема структурная.</p> <p>2. Схема функциональная.</p> <p>3. Опросные листы.</p> <p>4. Спецификация приборов и средств автоматизации.</p> <p>5. Заказная спецификация приборов и средств автоматизации.</p> <p>6. Схема монтажная.</p> <p>7. Схема принципиальная электрическая.</p> <p>8. Схема расположения блоков зажимов в щите.</p> <p>9. Перечень элементов щита управления лабораторным стендом дизельного ДВС.</p> <p>10. Сборочный чертеж щита управления.</p> <p>11. Общий вид щита управления.</p> <p>12. Спецификация щита управления лабораторным стендом дизельного ДВС.</p>

#### Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Спицына Любовь Юрьевна
Социальная ответственность	Романова Светлана Владимировна

#### Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:

Исследовательские изыскания (Researches of micro-explosion and puffing effects in two-fluid droplets)
---

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	06.02.20
--	----------

#### Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ИШЭ	Стрижак Павел Александрович	д.ф.- м.н., профессор		

#### Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ82	Антонов Дмитрий Владимирович		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 164 с., 24 рис., 34 табл., 86 источник.

Ключевые слова: лабораторный стенд дизельного ДВС, вторичное измельчение капель топлив, топливный аэрозоль, микро-взрывная фрагментация капель топлив, автоматизированная система, микропроцессорные средства автоматизации.

Объектом автоматизации является лабораторный стенд дизельного ДВС, предназначенный для сжигания топливных эмульсий в условиях вторичного измельчения.

Цель работы – разработка автоматизированной системы управления лабораторным стендом дизельного ДВС, предназначенного для сжигания топливных эмульсий в условиях вторичного измельчения.

Представлены результаты по разработке автоматизированной системы управления лабораторным стендом дизельного ДВС, предназначенной для сжигания топливных эмульсий в условиях вторичного измельчения.

Основным преимуществом разработанной системы является наличие программно-оперативного комплекса на базе SCADA-системы, который повышает качество регулирования и быстродействия системы, а также позволяет вовремя отреагировать на любую сложную ситуацию в процессе эксплуатации системы.

## Обозначения и сокращения

**Автоматизированная система управления; АСУ:** комплекс аппаратных и программных средств, а также персонала, предназначенный для управления различными процессами в рамках технологического процесса, производства, предприятия.

**Автоматизированное рабочее место оператора; АРМ:** программно-технический комплекс, предназначенный для автоматизации деятельности определенного вида.

**Двигатель внутреннего сгорания; ДВС:** разновидность теплового двигателя, в котором топливо сгорает непосредственно в рабочей камере (внутри) двигателя.

**Комплекс технических средств; КТС:** комплекс, представляющий собой совокупность технических средств автоматизации, предназначенных для реализации управляющих технических систем.

**Номинальная статическая характеристика; НСХ:** номинально приписываемая средству измерений зависимость между значениями величин или сигналов на выходе и входе средства измерений в статическом режиме, выраженная в виде формулы, графика или таблицы.

**Программируемый логический контроллер; ПЛК:** специальная разновидность электронной вычислительной машины.

**Программное обеспечение; ПО:** программа или множество программ, используемых для управления компьютером.

**Устройство связи с объектом; УСО:** устройство для объединения аналоговых и цифровых параметров реального технологического объекта.

**Supervisory Control And Data Acquisition; SCADA:** программный пакет, предназначенный для разработки или обеспечения работы, в реальном времени систем сбора, обработки, отображения и архивирования информации об объекте мониторинга или управления.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	11
1 НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ РАБОТА .....	14
1.1 Цель и задачи исследований .....	18
1.2 Исследуемые материалы .....	19
1.2.1 Неперемешанные двухжидкостные капли .....	20
1.2.2 Перемешанные капли топливных эмульсий .....	21
1.3 Характеристики распада и зажигания .....	22
1.4 Влияние температуры греющей среды (теплового потока) .....	24
1.5 Влияние концентрации горючей жидкости.....	25
1.6 Одиночные и группа капель топливных эмульсий в свободном падении .....	27
1.7 Распыл топливной эмульсии в дизельном двигателе.....	30
1.8 Расчет погрешностей измерений.....	32
1.9 Использование результатов исследований.....	34
2 ПРОЕКТИРОВАНИЕ АСУ ПОДГОТОВКИ И СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА В ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ С МИКРО-ВЗРЫВНОЙ ФРАГМЕНТАЦИЕЙ КАПЕЛЬ ТОПЛИВ .....	36
2.1 Системный анализ объекта автоматизации.....	36
2.2 Анализ нормативных документов.....	42
2.3 Разработка структуры КТС автоматизированной системы управления .....	44
2.3.1 Определение перечня функций, архитектуры и состава комплекса технических средств АСУ .....	44
2.3.2 Проектирование структурных схем КТС измерительных каналов на лабораторном стенде дизельного ДВС .....	48
2.3.3 Техническое задание на проектирование и разработку АСУ лабораторного стенда дизельного ДВС.....	50
2.3.4 Проектирование структурных схем КТС АСУ на основе микропроцессорной техники .....	54
2.3.5 Оценка погрешностей измерительных каналов .....	55
2.4 Разработка функциональной схемы системы управления.....	56
2.5 Составление опросных листов на приборы и средства автоматизации .....	58

2.6 Выбор технических средств системы управления, составление спецификации .....	59
2.6.1 Составление спецификации ТСА .....	59
2.6.2 Выбор ТСА .....	59
2.7 Составление перечня входных и выходных сигналов .....	73
2.8 Проектирование схемы внешних проводок .....	74
2.9 Разработка принципиальной электрической схемы щита управления ..	76
2.10 Составление перечня элементов щита управления .....	79
2.11 Разработка сборочного чертежа щита управления.....	79
2.12 Составление спецификации щита управления .....	81
2.13 Разработка фрагментов информационного, математического и программного обеспечений.....	83
2.14 Разработка мнемосхем SCADA-системы .....	84
2.15 Выводы по разделу Проектирование АСУ подготовки и сжигания топлива в двигательной установке с микро-взрывной фрагментацией капель топлив .....	86
3 РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ НАСТРОЙКИ РЕГУЛЯТОРА .....	88
3.1 Идентификация объекта управления .....	88
3.2 Расчет оптимальных параметров настройки (ОПН) ПИ-регулятора .....	90
3.2.1 Обоснование и выбор ОПН регулятора.....	90
3.2.2 Расчет и построение переходного процесса, оценка его качества.....	92
3.3 Вывод по разделу Расчет параметров настройки регулятора .....	96
4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	98
4.1 Анализ конкурентных технических решений .....	100
4.2 FAST-анализ .....	102
4.2.1 Выбор объекта FAST-анализа .....	102
4.2.2 Описание главной, основных и вспомогательных функций, выполняемых объектом.....	102
4.2.3 Определение значимости выполняемых функций объектом .....	103
4.2.4 Анализ стоимости функций, выполняемых объектом исследования .....	104



4.2.5 Построение функционально-стоимостной диаграммы объекта и ее анализ .....	105
4.2.6 Оптимизация функций, выполняемых объектом .....	105
4.3 Планирование научно-исследовательских работ .....	106
4.4 Бюджет научно-технического исследования (НТИ) .....	113
4.4.1 Расчет материальных затрат НТИ.....	113
4.4.2 Амортизация.....	114
4.4.3 Основная заработная плата исполнителей .....	114
4.4.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления).....	118
4.4.5 Накладные расходы .....	119
4.4.6 Формирование затрат научно-исследовательского проекта .....	119
4.5 Ресурсоэффективность .....	120
4.6 Вывод по разделу Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение .....	121
5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....	123
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности ....	124
5.1.1 Специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства.....	124
5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны ....	125
5.2 Профессиональная социальная безопасность .....	125
5.2.1 Анализ вредных и опасных факторов.....	125
5.3 Экологическая безопасность.....	134
5.3.1 Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду .....	134
5.3.2 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды .....	134
5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....	135
5.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований .....	135
5.4.2 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС .....	136
5.5 Выводы по разделу Социальная ответственность.....	137
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	138
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	140

Приложение A Researches of micro-explosion and puffing effects in two-fluid droplets .....	151
--	-----

Графический материал:	на отдельных листах
ФЮРА.421000.002 С1	Схема структурная
ФЮРА.421000.002 С2	Схема функциональная
ФЮРА.421000.002 ОЛ1 –	Опросные листы
ФЮРА.421000.002 ОЛ16	Спецификация приборов
ФЮРА.421000.002 ЗС1	и средств автоматизации
ФЮРА.421000.002 ЗС	Заказная спецификация приборов
	и средств автоматизации
ФЮРА.421000.002 С4	Схема монтажная
ФЮРА.421000.002 Э4	Схема принципиальная электрическая
ФЮРА.421000.002 Э7	Схема расположения блоков зажимов в щите
ФЮРА.421000.002 ПЭ	Перечень элементов щита управления
	лабораторным стендом дизельного ДВС
ФЮРА.421000.002 СБ	Сборочный чертеж щита управления
ФЮРА.421000.002 ВО	Вид общий щита управления
ФЮРА.421000.002 СБС	Спецификация щита управления лабораторным
	стендом дизельного ДВС

## ВВЕДЕНИЕ

Автоматизацией технологического процесса называют такую организацию оперативного управления производственными процессами, когда оно осуществляется централизованно человеком-оператором [1]. В условиях современной экономики автоматизация производственных процессов является одним из главных направлений технического прогресса, т.к. применение автоматизированных систем позволяет повысить экономичность установок.

Автоматизация производственных процессов решается на базе применения комплекса различных типов устройств [2, 3]. Основными из них являются устройства теплотехнического контроля, дистанционного управления, технологической сигнализации, тепловой защиты и блокировок, автоматического регулирования, автоматического управления, а также устройства сигнализации и связи.

Задача управления лабораторным стендом дизельного ДВС, предназначенного для сжигания топливных эмульсий в условиях вторичного измельчения, заключается в обеспечении его нормальной работы, в поддержании постоянства или изменения по определенному закону различных физических величин [4]. В частности, такими величинами являются: давление, температура, уровень воды, дизельного топлива и т.д.

Вторичное измельчение капель многокомпонентных топлив (в режиме частичной и полной фрагментации) является одной из перспективных технологий, способствующей минимизации расхода топлива, повышению динамических характеристик горения, снижению антропогенных выбросов, стабилизации процесса распыления топлива в камере сгорания, уменьшению износа оборудования [5]. Взрывное измельчение позволяет обеспечить дробление капель многокомпонентных топлив до нескольких десятков и сотен микрометров [6]. Это позволяет многократно увеличить площадь поверхности испарения и химического реагирования. В данном аспекте получение

мелкодисперсного аэрозоля в результате взрывного дробления является наиболее оптимальным вариантом, с точки зрения минимизации затрат энергии и времени.

Целью данной работы является разработка автоматизированной системы управления лабораторным стендом дизельного ДВС, предназначенного для сжигания топливных эмульсий в условиях вторичного измельчения.

При выполнении работы требуется решить задачи:

- провести системный анализ объекта автоматизации;
- выбрать структуру автоматизированной системы регулирования;
- разработать функциональную схему АСУ;
- составить опросные листы на приборы и средства автоматизации;
- выбрать технические средства АСУ и составить заказную спецификацию;
- составить перечень входных и выходных сигналов;
- разработать принципиальную электрическую схему щита управления;
- составить перечень элементов щита управления;
- спроектировать схему внешних проводок;
- разработать сборочный чертеж щита управления;
- составить спецификацию щита управления;
- разработать фрагменты информационного, математического и программного обеспечений;
- разработать мнемосхемы SCADA-системы.

Полученные результаты исследований будут интересны в сфере образования для студентов и аспирантов:

- для изучения процессов тепломассопереноса при нагреве топливных эмульсий;
- для изучения влияния свойств топливных эмульсий на характеристики их распада и зажигания;

- для определения влияния температуры и концентрации горючей жидкости на время задержки распада и зажигания топливных эмульсий;
- для исследования систем управления установками с использованием дизельных двигателей в лабораторных условиях.

Экспериментальная и теоретическая информационная база характеристик распада и зажигания топливных эмульсий будет востребована в научной сфере при разработке технологий сжигания таких топлив, создании математических моделей, получении новых знаний о процессах тепломассопереноса и фазовых превращениях, протекающих при нагреве топливных эмульсий. Развитие исследований в этом направлении позволит разработать эффективные автоматизированные технологии топливоприготовления и сжигания в двигательных установках с микро-взрывной фрагментацией капель топлив [7].

# 1 НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ РАБОТА

Газопарокапельные потоки различного состава и дисперсности являются достаточно распространенной технологической средой для современных аппаратов, устройств и систем. В частности, впрыск жидкости в высокотемпературную газовую или парогазовую среду осуществляется в широкой группе производственных технологий: контактные теплообменные аппараты [8, 9], системы термической и огневой очистки жидкости от нерегламентированных примесей [10], камеры сгорания жидких и суспензионных топлив [11, 12], двигатели внутреннего сгорания [13, 14], технологии пожаротушения [15, 16] и др. Эффективность таких технологий во многом зависит от интенсивности процессов нагрева и испарения жидкости в разогретой газовой среде. В связи с этим рациональным представляется увеличение площади поверхности испарения и химического реагирования путем уменьшения размеров капель распыляемых жидкостей. Применение традиционных средств первичного измельчения (форсуночные устройства, капилляры, нагнетатели) для данных целей сопряжено с рядом сложностей и ограничений. Результаты экспериментов [17] показали, что большая доля жидкости в составе мелкодисперсных капельных потоков может быть унесена из зоны горения, испарения или интенсивного тепломассообмена вследствие возникающих эффектов торможения и разворота. Это может негативно сказываться на эффективности технологического процесса. Одним из путей решения данной проблемы может стать вторичное измельчение капель непосредственно в рабочей камере (в частности, топочной камере или выпарной установке) [17].

Среди известных способов вторичного измельчения в качестве наиболее распространенных можно выделить следующие: дробление капель жидкостей в результате их соударений между собой при движении в газовой среде [18, 19], столкновения капель с твердой поверхностью (в том числе разогретой) [20–22], измельчение капель при воздействии потока воздуха (разрушение

капли в газовой среде) [23], а также микро-взрывная фрагментация неоднородных капель топлив при перегреве низкокипящего компонента, входящего в их состав [24, 25]. Измельчение капель за счет микро-взрывной фрагментации является наиболее перспективным, поскольку благодаря данной схеме можно добиться получения мелкодисперсного аэрозоля (уменьшение размера капель на порядок относительно исходных размеров), что позволяет многократно увеличить площадь поверхности испарения, снизить инерционность зажигания жидкого топлива, уменьшить износ оборудования, а также снизить газовые антропогенные выбросы [26]. Эффекты микро-взрывной фрагментации характерны каплям с существенно неоднородным составом при наличии низкокипящего компонента – воды: топливные смеси [27, 28], неперемешанные двух- и многокомпонентные жидкостные фрагменты при выпаривании примесей [26, 29], а также капли эмульсий различного назначения (пожаротушение, химические производства и др.) [30, 31]. Изучению условий и характеристик микро-взрывов посвящена довольно большая группа работ. В частности, в данном направлении можно отметить экспериментальные исследования [24–33]. Основное влияние на время задержки распада (т.е. прогрева до условий разрушения), а также характеристики микро-взрывной фрагментации оказывают такие параметры как температура греющей среды [25, 28, 30], начальный размер капель [24, 28, 29], концентрация, тип (соответственно, свойства: вязкость, поверхностное и межфазное натяжение) и характеристики фазовых превращений (скорость испарения, теплота парообразования, температура кипения) компонентов [25, 26, 28], а также размер капелек дисперсной фазы в каплях эмульсий [30, 32, 33]. Так, например, в [25, 28, 30] установлено, что с ростом температуры греющей среды (с использованием группы стендов, позволяющих варьировать доминирующий механизм теплообмена: конвективный, кондуктивный, радиационный) существенно нелинейно снижается время задержки микро-взрывного распада и растет вероятность (т.е. частота реализации) микро-взрыва. Установлено, что минимальное время задержки распада, а также

значимые последствия (т.е. большее количество мелких капелек) соответствуют минимальным концентрациям (до 3 об.%) негорючего компонента – воды [25, 28]. Размер капелек дисперсной фазы в каплях эмульсий оказывает существенное влияние как на последствия, так и время задержки микро-взрывного распада [30, 32, 33]. Уменьшение размеров капелек дисперсной фазы приводит к повышению метастабильности капли, что требует большего количества энергии для её разрушения [32]. В тоже время уменьшение размеров капелек дисперсной фазы до определенного уровня способствует увеличению количества вторичных капель и их скоростей [33]. В качестве основных критических условий распада принято считать: перегрев межкомпонентной границы выше температуры кипения менее летучего компонента (воды) [28], превышение размера капли в 2–3 раза относительно начальных характерных размеров вследствие наполнения паровыми пузырьками [25]. Данные критические условия используются в моделях микро-взрывного распада, позволяющих с удовлетворительной точностью прогнозировать время задержки распада при варьировании вклада ряда факторов [24, 34, 35].

Большинство исследований в выделенной сфере посвящено исследованию микро-взрыва одиночных капель, нагрев которых производится с использованием различных вспомогательных приспособлений: держателей [26, 28, 29, 31], подложек и стенок [30, 32, 33], что делает затруднительным применение полученных результатов в ряде технологий, например, [8–17], в которых капли прогреваются за счет конвективного или лучистого теплообмена с газовой средой. Наибольший интерес представляют схемы, где нагрев капель происходит в процессе их движения в разогретой газовой среде, поскольку такие условия нагрева капель наиболее приближены к существующим и перспективным технологиям. Такие схемы также делают возможным последовательное применение нескольких вариантов вторичного измельчения (путем комбинации различных подходов) [36]. В данной области можно отметить работы [25, 37], в которых процессы нагрева, испарения и



фрагментации двухкомпонентных предварительно неперемешанных и перемешанных капель регистрировались при движении капель в потоке высокотемпературных (850...1100 °С) газов. Результаты [25, 37] демонстрируют существенное влияние процесса движения капель на характеристики их фрагментации. Установлено [25, 37], что благодаря эффектам микро-взрыва возможно существенно снизить время задержки зажигания неоднородных капель в сравнении с жидкими топливами без добавления воды.

Неизученным в полной мере остается влияние коллективных эффектов, возникающих в аэрозольных потоках за счет взаимодействия соседних капель. В [38] показано, что при последовательном движении капель друг за другом в потоке высокотемпературных газов реализуются следующие процессы: движущиеся впереди капли испаряются более интенсивно, чем следующие за ними из-за образования парового буферного слоя, который снижает время прогрева и полного испарения последующих капель. Также установлено, что каждая последующая капля движется быстрее и испаряется медленнее (отличия этих характеристик для капель в разных эшелонах могут достигать 30...40 %), чем впереди идущая капля [38]. В [39] установлено, что время задержки зажигания нескольких капель органоводоугольного топлива могут значительно отличаться от время задержки зажигания одиночных капель при одинаковых условиях нагрева, значительное влияние оказывает взаимное расположение капель и расстояние между ними. В соответствии с результатами, полученными в работах [38, 39] важно исследовать влияние коллективных эффектов на процессы микро-взрыва группы капель неоднородных топлив при их движении в камере сгорания для развития группы технологий [8–17], а также сравнить результаты измельчения одиночных и группы капель.

## 1.1 Цель и задачи исследований

Целью исследований являлся анализ возможных эффектов интенсификации процессов измельчения одиночных и группы двухжидкостных капель.

Основные задачи исследований:

- 1) приготовление топливных эмульсий с использованием горючих и негорючих жидкостей, а также эмульгаторов и стабилизаторов;
- 2) разработка методики экспериментальных исследований микро-взрывного распада и последующего зажигания топливных эмульсий в высокотемпературной газовой среде;
- 3) разработка схемы и монтаж экспериментального стенда с применением высокоскоростной регистрирующей аппаратуры, планирование и проведение экспериментов;
- 4) выделение режимов распада капель топливных эмульсий;
- 5) определение временных характеристик и последствий микро-взрывного распада топливных эмульсий в высокотемпературной газовой среде при влиянии различных параметров системы;
- 6) сравнение исследований для одиночных и группы капель;
- 7) апробация результатов на российских и международных конференциях;
- 8) разработка рекомендаций по использованию результатов выполненных фундаментальных экспериментальных исследований в энергетических технологиях, а также различных отраслях народного хозяйства и промышленности.

Регистрируемые параметры: режимы распада и существования двухжидкостных капель (микровзрыв, диспергирование, испарение); предельные температуры и тепловые потоки при распаде ( $T_a$  и  $q$ ); время задержки распада ( $\tau$ ); отношение площадей поверхности испарения ( $S_1/S_0$ ). Регистрируемые параметры определялись, исходя из наиболее типичных регистрируемых параметров в актуальной литературе (русские и зарубежные журналы).

Варьируемые параметры: температура газовой среды ( $T_a=100\dots1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), концентрации горючей жидкости ( $\eta=0\dots100\text{ об.}\%$ ). В качестве варьируемых параметров могут быть выбраны температуры газов, размеры и скорости капель, концентрации горючей жидкости. Однако не все параметры оказывают значительное влияние на исследуемые процессы микровзрыва. Выбор варьируемых параметров обусловлен тем, что на процессы взрывного дробления оказывают наибольшее влияние температура газовой среды и концентрация горючей жидкости, что установлено в работах с использованием держателей и подложек [5, 6].

## 1.2 Исследуемые материалы

В экспериментах использовались типичные для топливных технологий, а также термической и огневой очистки жидкостей от нерегламентированных примесей вещества (таблица 1.1): керосин, бензин, дизельное топливо, трансформаторное масло, нефть, рапсовое масло. Данные в таблице 1.1 приведены на основании обобщения данных [5, 6] для последующего анализа возможных изменений результатов опытов в случае применения жидких горючих компонентов из разных регионов мира. При проведении исследований использовались два типа топливных эмульсий: перемешанные и неперемешанные двухжидкостные капли.

Таблица 1.1 – Свойства жидких горючих компонентов (при  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) [5, 6]

Наименование компонента	$\lambda$ , Вт/(м·°C)	$C$ , Дж/(кг·°C)	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\mu$ , Па·с	$\sigma$ , Н/м
Трансформаторное масло	0,111	1666	880	0,0198	0,009
Керосин ТС-1	0,126	2000	819	0,0015	0,024
Бензин	0,110	2090	735	0,0005	0,021
Дизельное топливо	0,117	1873	879	0,0331	0,008
Нефть	0,121	880	885	0,0061	0,030
Рапсовое масло	0,167	2000	907	0,0283	0,067

**Примечание:**  $\lambda$  – теплопроводность, Вт/(м·°C);  $C$  – теплоемкость, Дж/(кг·°C);  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu$  – динамическая вязкость, Па·с;  $\sigma$  – поверхностное напряжение, Н/м.

### 1.2.1 Неперемешанные двухжидкостные капли

Методика получения неперемешанных двухжидкостных капель аналогична использованным в опытах [5, 6]. Использованы две схемы получения неперемешанных двухжидкостных капель. В первой капля воды подвешивалась на держатель. Использовался электронный дозатор Finnpiquette Novus (шаг варьирования генерируемого объема  $10^{-10}$  м<sup>3</sup>). Далее на каплю воды при помощи второго дозатора Finnpiquette Novus помещалась капля горючего компонента. Высокоскоростная видеорегистрация показала, что горючая примесь, как правило, обволакивала каплю воды, создавая на ее поверхности пленку толщиной 0,00005...0,0005 м. Чаще всего вода располагалась в верхней части капли, контактируя с держателем, а горючая примесь концентрировалась в нижней части. При реализации второй схемы, наоборот, на держатель помещалась капля горючей или легковоспламеняющейся жидкости, затем – воды. В данной схеме горючая примесь концентрировалась в верхней части капли, а вода, напротив, – в нижней. Так как поверхностное натяжение жидкого горючего компонента существенно ниже, чем воды, то для максимального эффекта микро-взрывного распада капель целесообразно в центре использовать воду, а в виде оболочки применять жидкий горючий компонент.

В качестве держателя капель (как неперемешанных, так и перемешанных эмульсий) применялся полый металлический стержень с внутренним и внешним диаметром 0,0003 и 0,0006 м, соответственно. Материал держателя – сталь X6CrNiMoTi 17-12-2. По сравнению с другими материалами (керамика, фосфор, железо, нихром и др.), а также схемами закрепления капель на держателе полый металлический держатель оказывал наименьшее влияние на прогрев исследованных капель. Соответствующие оценки выполнены в работе [40] за счет сравнения экспериментальных и теоретических результатов исследований.

На рисунке 1.1 показана условная схема получения неперемешанной двухжидкостной капли. Начальный объем неперемешанной двухжидкостной

капли в экспериментах варьировался в диапазоне  $V_d=(10...25) \cdot 10^{-9} \text{ м}^3$ . Это соответствовало диапазону изменения радиуса  $R_d=(1,3...1,8) \cdot 10^{-3} \text{ м}$ . Получение неперемешанных двухжидкостных капель меньшего размера было сложно осуществить вследствие ограничений по минимальному дозируемому объему (не менее  $10^{-10} \text{ м}^3$ ) в электронном дозаторе. Капли большего объема срывались с держателя еще до помещения в нагревательную камеру.

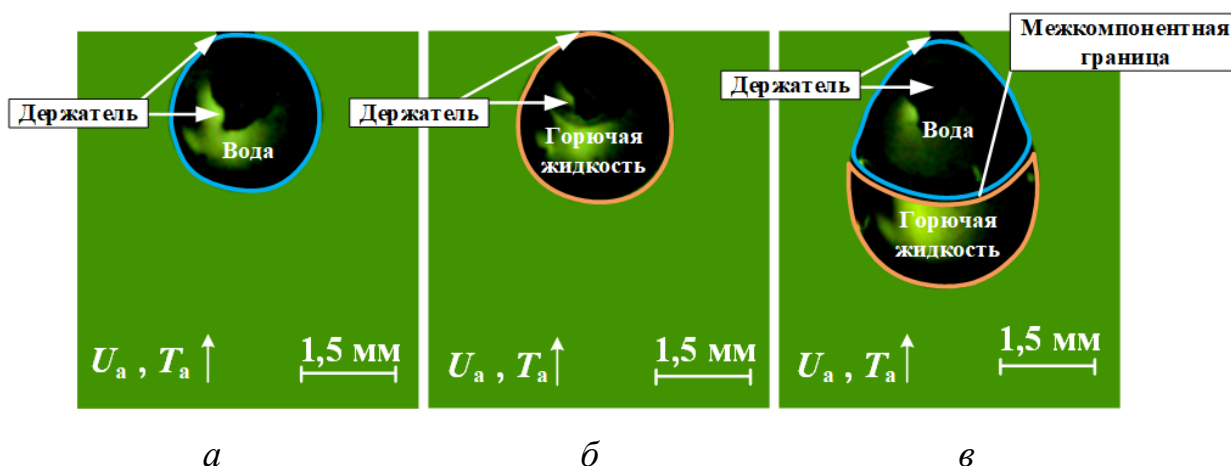


Рисунок 1.1 – Внешний вид исходных капель воды (а) и горючего компонента (б), а также типичной неперемешанной двухжидкостной капли с индикацией межкомпонентной границы (в)

### 1.2.2 Перемешанные капли топливных эмульсий

При приготовлении топливных эмульсий использовались дизельное топливо ДТ-Л-К5 (летнее) по ГОСТ 32511-2013 и вода дистиллированная по ГОСТ 6709-72. Эмульсии получали на высокоскоростном миксере GJ-3S (Qingdao ChuangMeng Instrument, Китай). Навеску эмульгатора растворяли в отмеренном объеме дизельного топлива. В полученный раствор при перемешивании со частотой вращения 180 об/с постепенно вводили требуемый объем дистиллированной воды, после чего перемешивали в течение 420 с в тех же условиях. Полученную эмульсию дегазировали под вакуумом, создаваемым водоструйным насосом, не менее 1200 с. На рисунке 1.2 приведены кадры с изображением капли типичной приготовленной топливной эмульсии. Изображение на рисунке 1.2б получено методом Laser

Scanning Confocal Microscopy (LSCM) с помощью микроскопа ZEISS LSM 780 NLO в режиме T-PMT (transmission light) с использованием лазерной линии  $405 \cdot 10^{-9}$  м. В исследуемой эмульсии наиболее представлены капли воды с диаметром  $(0,8 \dots 0,9) \cdot 10^{-6}$  м. Средний диаметр капель  $1,2 \cdot 10^{-6}$  м.

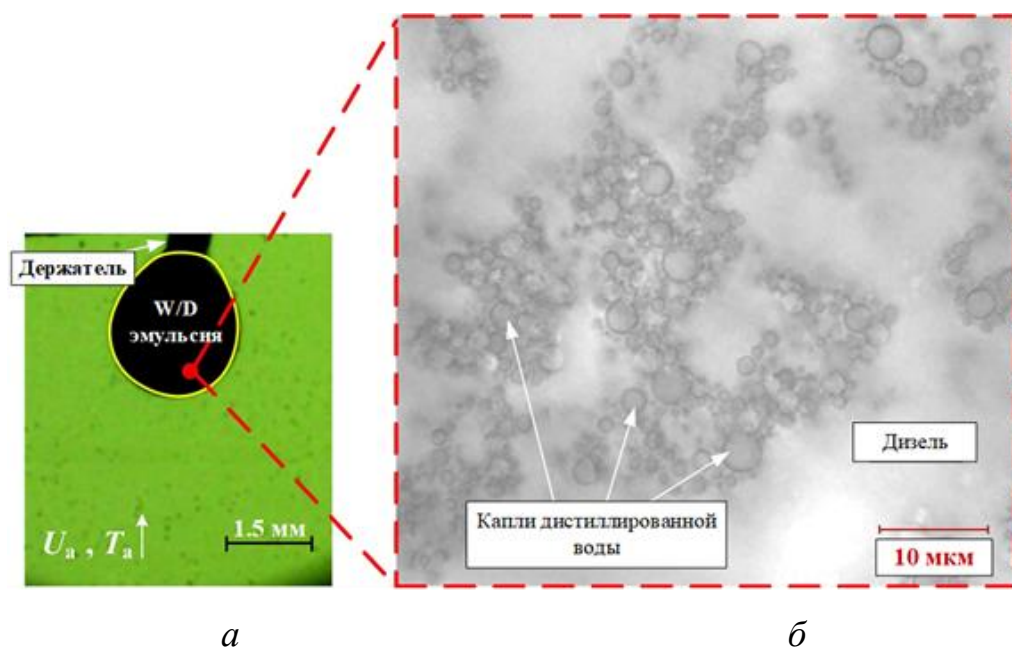


Рисунок 1.2 – Капля типичной приготовленной топливной эмульсии (а); изображение капли эмульсии, полученное методом LSCM (б)

### 1.3 Характеристики распада и зажигания

На рисунке 1.3 представлены видеокадры с иллюстрацией установленных режимов прогрева, испарения и измельчения топливных эмульсий. Каждый из представленных вариантов последствий характеризовался рядом особенностей. Так, например, для режима монотонного испарения характерным было то, что капля интенсивно прогревалась и испарялась, постепенно уменьшаясь в размерах, пузыри образовывались не по всему объему, а в основном локально. Для режима диспергирования процессы зарождения пузырьков реализовывались практически во всем объеме капли. Разрушение (схлопывание) пузырьков сопровождалось отрывом частей капли. При увеличении температуры газового потока, либо увеличении концентрации горючей жидкости

реализовывались режим микро-взрывного распада, характеризующийся интенсивным формированием пузырей во всем объеме. На начальном этапе капля прогревалась, никаких изменений с поверхностью капли практически не происходило, а затем регистрировался громкий хлопок, характеризующийся мгновенным дроблением капли. Образовывался мелкодисперсный аэрозоль с четко детектируемыми парами. Наличие последних можно было регистрировать как визуально за счет применения высокоскоростной видеокамеры и явно выраженного тумана (смога), а также по характерному запаху паров горючего компонента и углекислого газа.

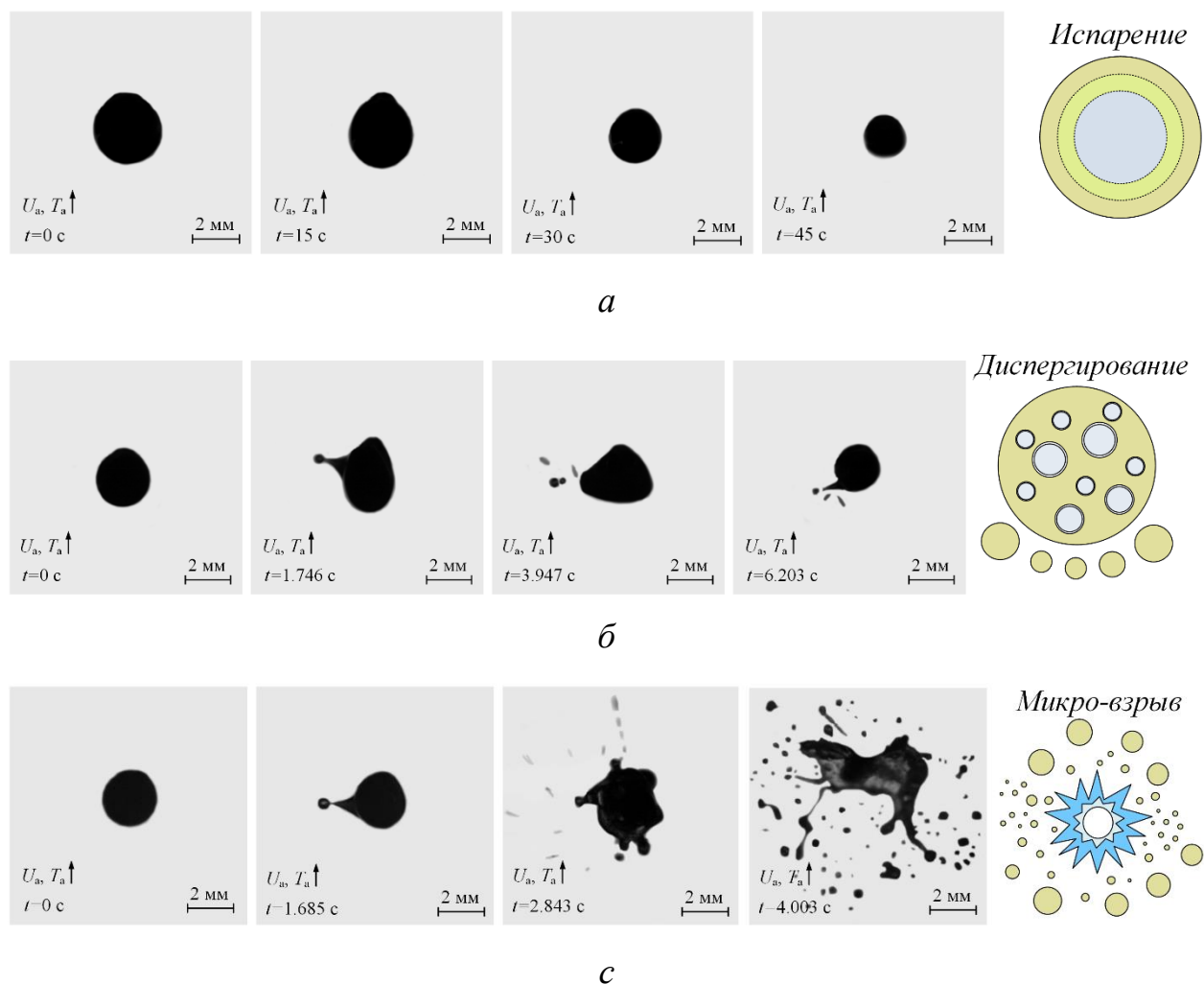


Рисунок 1.3 – Видеокадры и схемы режимов прогрева, испарения и измельчения капель топливных эмульсий ( $U_a \approx 3$  м/с,  $R_{d0} \approx 1,21$  мм,  $\eta \approx 90$  об.%):  
*a* – испарение ( $T_a \approx 200$  °С), *б* – диспергирование ( $T_a \approx 300$  °С), *с* – микро-взрыв ( $T_a \approx 400$  °С)

#### 1.4 Влияние температуры греющей среды (теплового потока)

На рисунке 1.4 представлена зависимость время задержки взрывного распада двухкомпонентных капель (вода + дизельное топливо) от плотности теплового потока. Видно, что диапазоны изменения плотностей тепловых потоков (соответствующие реализации взрывного распада капель) при конвективном и кондуктивном нагреве практически совпадают, и они значительно превосходят значения плотностей радиационного теплового потока. Поэтому при радиационном нагреве время задержки распада максимальны. Расчеты плотностей тепловых потоков проводились при конкретных значениях, иллюстрирующих оптические и теплофизические свойства компонентов системы. В реальной практике данные свойства могут отличаться от использованных в расчете в пределах 10...15 %. Как следствие, количественные значения  $q_{\text{conv}}$ ,  $q_{\text{rad}}$  и  $q_{\text{cond}}$  могут отличаться в соответствующих пределах, но внешний вид зависимостей  $\tau(q)$  и относительное расположение кривых не изменится во всем реальном диапазоне изменения параметров.

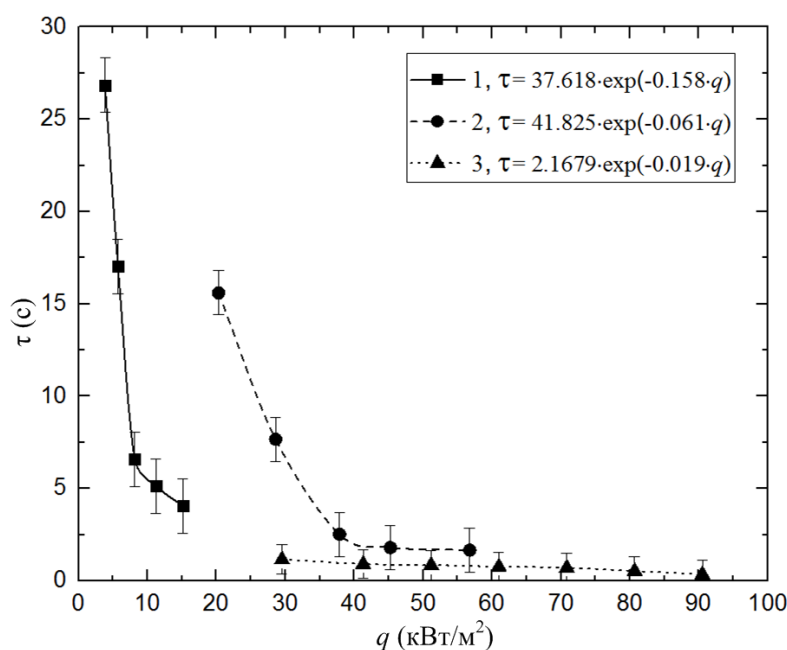


Рисунок 1.4 – Время задержки взрывного распада двухкомпонентных капель ( $V_d=15 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3$ ,  $\eta=90$  об. %) при изменении плотности теплового потока при радиационном (1), конвективном (2) и кондуктивном (3) нагреве



### 1.5 Влияние концентрации горючей жидкости

Наиболее ценными научными результатами для развития газопарокапельных технологиях в области дизельных двигателей является зависимость время задержки распада от концентрации горючей жидкости (рисунок 1.5). Важный результат выполненных экспериментов заключается в определении максимальных длительностей (наиболее инерционных условий) прогрева каплей до взрывного дробления, которые соответствуют равным концентрациям воды и горючей жидкости (или топлива) в капле (рисунок 1.5). При существенном превышении концентрации одного из компонентов над другим регистрировалось наименьшее время прогрева до распада каплей.

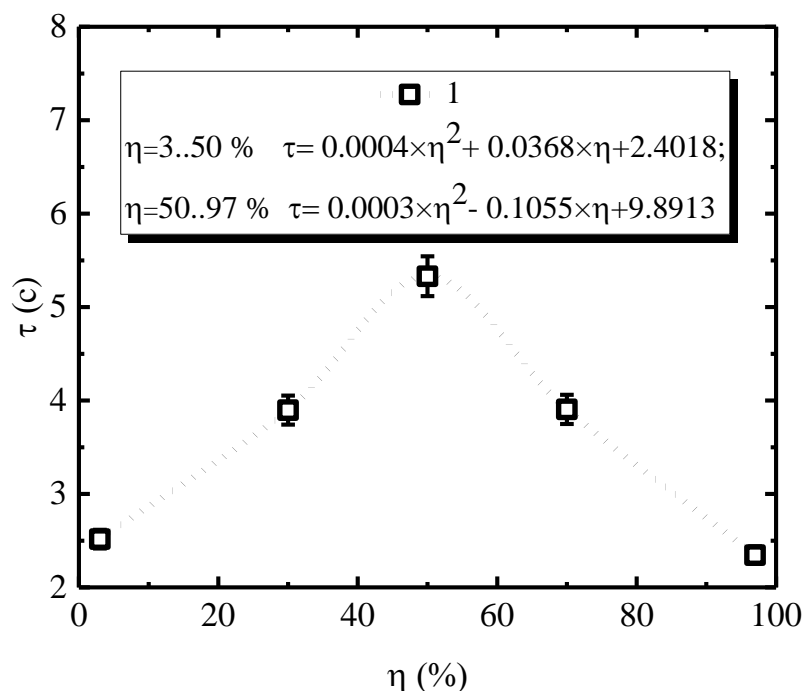


Рисунок 1.5 – Время задержки распада двухкомпонентной капли (объемом  $15 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3$ ) при варьировании концентрации горючей жидкости (дизельного топлива). Конвективный нагрев в потоке разогретого воздуха при  $350^\circ\text{C}$  и скорости  $3 \text{ м/с}$

Немонотонный характер кривой на рисунке 1.5 иллюстрирует сложный механизм разрушения двухкомпонентных капель в потоке нагретого воздуха. Можно обоснованно полагать, что взрывной распад такой капли происходит,

если сумма разрывающих каплю сил превышают сумму сил, способствующих сохранению ее монолитности. К первым относятся силы, обусловленные давлением паров воды, образующихся на некотором удалении от нагреваемой поверхности при интенсивном испарении и кипении в условиях нагрева до высоких температур мелких капель, являющихся частью водотопливной эмульсии. В результате разрушается монолитность приповерхностного слоя капли эмульсии, существенно снижается его вязкость и предел прочности при сдвиге. К силам, разрушающим каплю, относятся и касательные напряжения трения потока воздуха, обтекающего каплю. Касательные напряжения разрывают ослабленный в результате интенсивного парообразования приповерхностный слой капли, интенсифицируют выход пузырьков водяного пара во внешнюю среду и в конечном итоге разрушение исходной капли.

Увеличение доли топлива (горючего компонента) в эмульсии или двухкомпонентной капле в пределах 50 об.% приводит к другому эффекту – росту вязкости и прочности приповерхностного слоя исходной капли. В результате такого упрочнения приповерхностного слоя для эмульсий или двухкомпонентных капель растет время прогрева до разрушения (рисунок 1.5).

Но увеличение доли горючего компонента в эмульсии или двухкомпонентной капле приводит не только к их упрочнению, но и одновременно снижается ее теплоемкость. Чем меньше доля воды в капле, тем меньше теплоемкость и быстрее капля прогревается до температуры кипения воды на межкомпонентной границе. При достижении таких температур происходит существенная трансформация межкомпонентной границы и распад капли. Водяной пар при малых концентрациях воды в капле может быстро разогреться до предельно высоких температур, соответствующих высоким давлениям в пузырьках пара. При этом достигаются условия разрыва приповерхностного слоя эмульсии или двухкомпонентной капли, разогретой до более высоких температур, чем при малой концентрации горючего. Правая часть кривой на рисунке 1.5 соответствует условиям такого разрушения капли.

Установленные в проведенных экспериментах закономерности прогрева и взрывного дробления двухкомпонентных капель несмешивающихся жидкостей с разной концентрацией компонентов показывают, что в целом исследованный эффект дробления можно успешно реализовывать в большой группе технологий и в разных условиях нагрева. При этом комбинирование температурных и концентрационных условий позволяет изменять время  $\tau$  в несколько раз. Этот результат является наиболее ценным в настоящей работе, так как он иллюстрирует допустимые диапазоны изменения параметров и целесообразные характеристики соответствующих камер термической очистки жидкостей или сжигания топлив, систем их впрыска. Важно обеспечить стадийное последовательное дробление капель в процессе нагрева и испарения. Целесообразно учитывать данные закономерности при проектировании тепловых камер и разработке регламентов соответствующих технологий.

#### 1.6 Одиночные и группа капель топливных эмульсий в свободном падении

Для приближения к реальным условиям газопарокапельных технологий был произведен переход от подвешенных капель топливных эмульсий к свободно падающим в разогретом воздухе. На рисунке 1.6 представлены схемы регистрации процессов микро-взрыва топливных эмульсий в свободном падении при высокотемпературном нагреве. Представлены схемы регистрации с использованием одиночных (*а*) и группы капель (*б*). В качестве нагревательной системы использована трубчатая муфельная печь (диапазон температур 20...1200 °С). Температура воздуха в центральной части рабочей камеры печи фиксировалась с помощью системы, состоящей из комплекса сбора данных National Instruments и малоинерционных термопар (погрешность не превышала 3 °С, время реакции менее 0,1 с). Трубчатая муфельная печь была зафиксирована под углом 90° относительно основания для того, чтобы свободно падающие капли топливных эмульсий могли пролететь через высокотемпературную камеру без контакта со стенками последней. Процесс

фрагментации перегреваемых капель регистрировался с помощью высокоскоростной видеокамеры (частота съемки до  $10^5$  кадров в секунду). Область регистрации в камере муфельной печи подсвечивалась снизу с помощью прожектора.

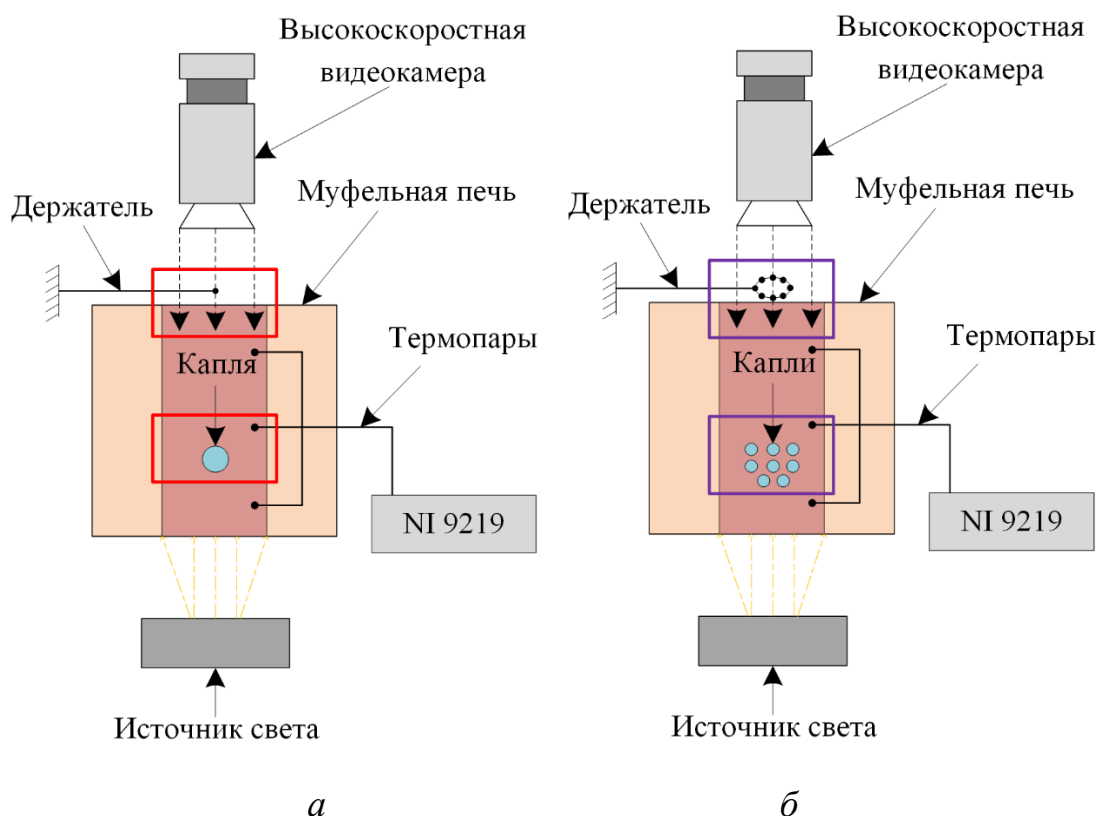


Рисунок 1.6 – Схема экспериментального стенда: *а* – с одиночными свободно падающими каплями; *б* – с группой свободно падающих капель

Методика проведения экспериментов предполагала несколько этапов. На держателе или группе держателей, представленном на рисунке 1.6, при помощи дозаторов формировались исследуемые капли топливных эмульсий заданного размера. Затем капли сбрасывались за счет механического контакта автоматизированного механизма с держателем и свободно падали в потоке высокотемпературных газов. Высокая скорость съемки обеспечивалась высокоскоростной камерой, регистрировавшей быстропротекающие процессы распада капель топливных эмульсий. Обработка видеоклипов осуществлялась с использованием программного обеспечения Phantom Camera Control. Частота съемки при проведении

экспериментов составляла 5400 кадров в секунду, температура в печи варьировалась в диапазоне 800...1100 °С, а диаметр исследуемых капель от 0,62 до 1,34 мм. Во время свободного падения на каплю воздействовали два основных тепловых потоков: радиационный (от стенок муфельной печи и разогретого газа) и конвективный (вследствие движения в высокотемпературной газовой среде). Эти два основных тепловых потока хорошо согласуются с перспективными газопарокапельными приложениями, перечисленными во введении. В частности, в реальных установках по сжиганию жидких топлив температура сжигания составляет 800...1200 °С, иногда и выше [13]. При этом скорость движения потока подаваемого в камеру сгорания воздуха составляет от 1...2 до 30...50 м/с [13]. Огневая очистка жидкостей осуществляется при температурах 900...1000 °С и скоростях движения капель от 0,5...1 до 5...7 м/с [10].

На рисунке 1.7 представлена карта режимов измельчения капель топливных эмульсий на основе рапсового масла 90 об. % и воды 10 об. % в зависимости от разницы время задержки распада первой и последующих капель  $\Delta t$  и отношения  $L/R_d$ , где  $L$  – расстояние между соседними каплями. Как можно видеть из рисунка 1.7 минимальное расстояние между соседними каплями для которых регистрировались процессы микро-взрывного распада составляет  $\sim 5R_d$ .

Также следует отметить, что при проведении экспериментов для мелких капель характерны режимы диспергирования и микро-взрыва, а также монотонное испарение (постепенное уменьшение размеров) без фрагментации. Последний режим регистрировался для капель в группе с малыми расстояниями между ними, т.е. когда капли идут достаточно близко (несколько характерных радиусов). Также важную роль играл тот фактор, что мелкие капли зажигались практически мгновенно вследствие высоких тепловых потоков.

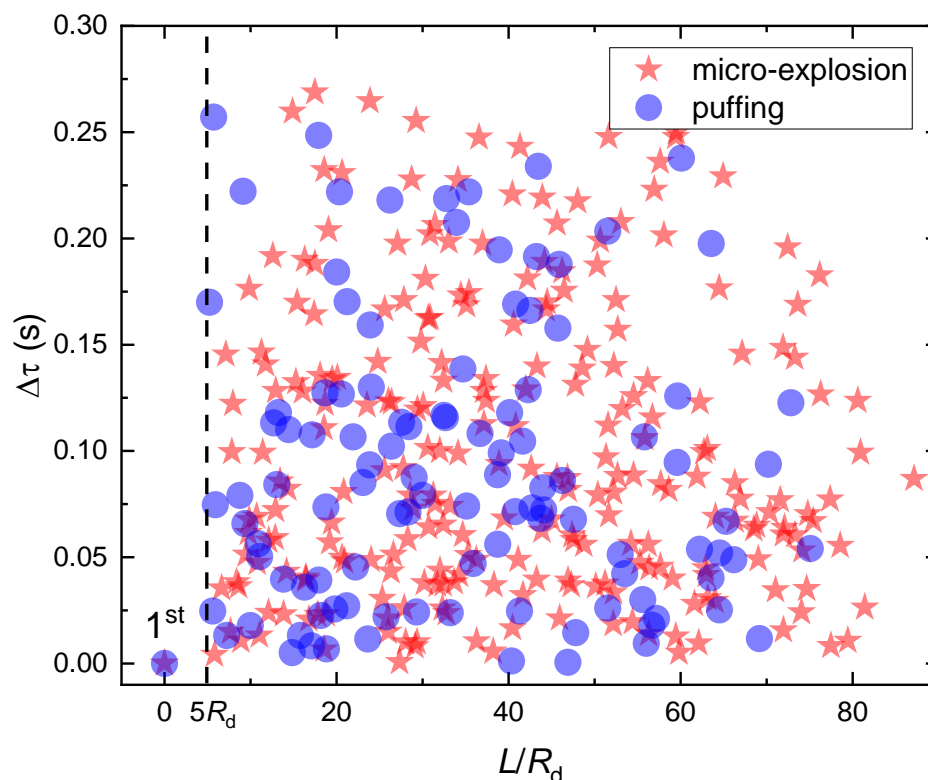


Рисунок 1.7 – Карта типичных режимов микро-взрывной фрагментации капель топливных эмульсий для различных соотношений  $L/R_d$  и разницы время задержки распада первой и последующих капель  $\Delta\tau$  (построена на основе обобщения данных для топливных эмульсий на основе рапсового масла 90 об. % и воды 10 об. % при температуре в муфельной печи около 950 °С, размеры капель перед распадом  $R_d=0,145\dots0,802$  мм). 1<sup>st</sup> –микро-взрыв (micro-explosion) или диспергирование (puffing) первой капли в эксперименте

### 1.7 Распыл топливной эмульсии в дизельном двигателе

Возможности перехода от фундаментальных исследований к практическим приложениям были рассмотрены на стажировке в университете Брайтона, г. Брайтон, Великобритания, на базе Школы вычислительной техники, инженерии и математики. Во время научной стажировки/научно-производственной практики реализована возможность работы с реальным дизельным двигателем внутреннего сгорания (производитель Vertigo engine)

[41]. Была детально изучена конструкция лабораторного стенда с использованием дизельного двигателя, основные элементы и важные части. Особое внимание было уделено тщательному изучению системы управления дизельным двигателем при проведении лабораторных исследований, поскольку это составляет часть магистерской диссертации, посвященной разработке автоматизированной системы подготовки и сжигания топлива в двигательной установке с использованием эффектов микро-взрывного измельчения. Также были проведены тестовые испытания распыла топлива на экспериментальном стенде с использованием дизельного двигателя в университете Брайтона. Кадры фрагментов экспериментального стенда с использованием дизельного двигателя в университете Брайтона представлены на рисунке 1.8.

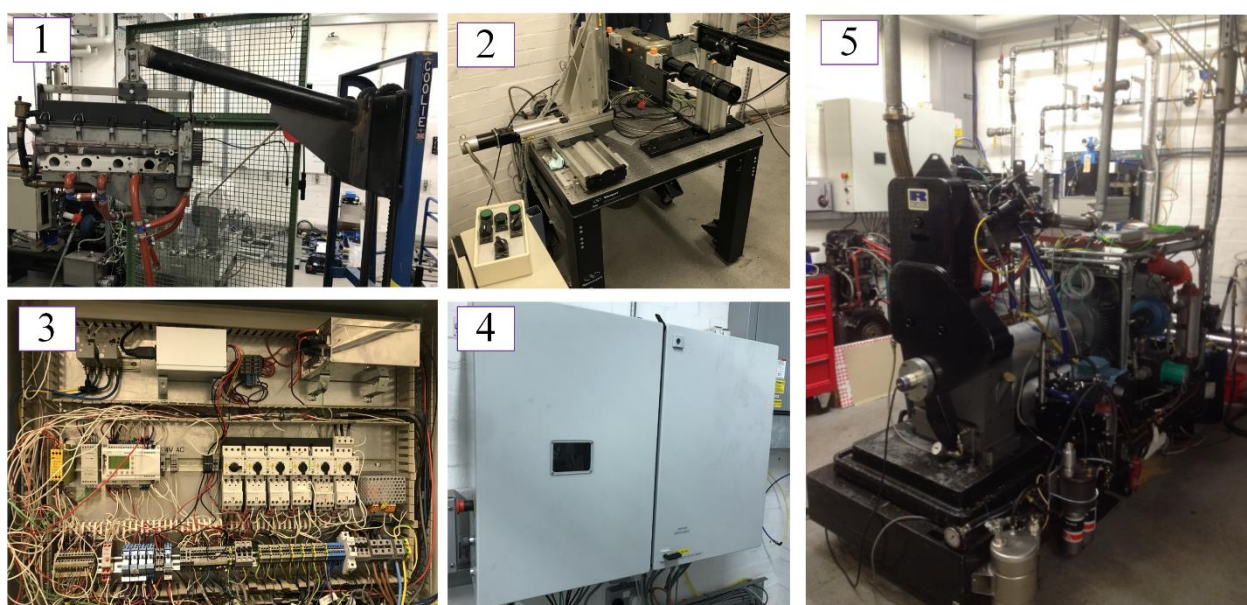


Рисунок 1.8 – Кадры фрагментов экспериментального стенда с использованием дизельного двигателя в университете Брайтона: 1 – двигатель внутреннего сгорания; 2 – регистрационная аппаратура (высокоскоростная камера, лазер, генератор и синхронизатор, панель управления); 3 – внутренняя панель щита автоматизации; 4 – внешняя панель щита автоматизации; 5 – лабораторная установка дизельного ДВС

При проведении тестовых испытаний топливных эмульсий выявлены основные ограничения, действующей экспериментальной установки, которые связаны с необходимостью использования специальных смотровых окон, позволяющих отслеживать процессы распыления топливной эмульсии в дизельном двигателе, а также необходимостью в использовании более высокоскоростной аппаратуры с более высоким увеличением области регистрации и разрешения. На данный момент эти ограничения не позволяют зарегистрировать быстротекающие процессы микро-взрывного распада в дизельных двигателях для капель микронных размеров, движущихся с высокой скоростью.

## 1.8 Расчет погрешностей измерений

**Расчет систематических погрешностей измерений.** Для измерения время задержки распада использована высокоскоростная камера Phantom Miro M310 и программное обеспечение «Phantom Camera Control». Частота кадров при съемке составляла 5400 кадров в секунду. Систематическая погрешность измерения время задержки распада складывалась из погрешности определения момента отрыва капли с держателя и момента фиксации микро-взрыва. В итоге, систематическая погрешность определялась следующим образом:

$$\Delta\tau_{\text{сист.}} = \pm 2 \cdot \frac{1}{\text{Frame rate}} = \pm 2 \cdot \frac{1}{5400} \approx \pm 3.7 \cdot 10^{-4} \text{ с.}$$

**Расчет доверительных интервалов цикла экспериментов.** После расчета систематических погрешностей прямых измерений определим доверительные интервалы цикла экспериментов для рис. 1.4 и рис. 1.5.

Доверительный интервал определяется по формуле:

$$\Delta = t(\alpha, n)^n S_x^2,$$



где  $t(\alpha, n)$  – коэффициент Стьюдента, зависящий от числа  $n$  (количество измерений) и выбранной величины доверительной вероятности  $\alpha$ ;  $S$  – средне-квадратичная погрешность результата серии измерений.

В таблице 1.2 и 1.3 представлены результаты расчета доверительных интервалов цикла экспериментов.

Таблица 1.2 – Результаты расчета доверительных интервалов цикла экспериментов для рис. 1.4

$q$ , кВт/м <sup>2</sup>	$V_d \cdot 10^9$ , м <sup>3</sup>	Состав	$\tau$ , с	$\Delta$ , с
3,87291	15	Вода 10 об.%, дизельное топливо 90 об.%	26,835	1,4722
5,746	15		17,035	
8,18	15		6,58067	
11,275	15		5,123	
15,144	15		4,047	
20,334	15		15,59433	1,1977
28,625	15		7,657	
37,886	15		2,516	
45,252	15		1,789	
56,768	15		1,65133	
29,516	15		1,14533	0,7878
41,323	15		0,897	
51,161	15		0,84333	
61,0	15		0,7567	
70,839	15		0,69733	
80,678	15		0,5143	
90,516	15		0,33867	

Таблица 1.3 – Результаты расчета доверительных интервалов цикла экспериментов для рис. 1.5

$\eta$ , об. %	$V_d \cdot 10^9$ , м <sup>3</sup>	$T_a$ , °C	$\tau$ , с	$\Delta$ , с
3	15	350	2,516	0,10064
30	15	350	3,897	0,15588
50	15	350	5,32967	0,21319
70	15	350	3,90533	0,15621
97	15	350	2,34533	0,09381

Для проведенных серий экспериментов были вычислены погрешности измерений, определены систематические погрешности и проведена оценка доверительных интервалов. На основании полученных значений погрешностей измерений сделан вывод о том, что определяющее влияние на погрешности прямых и косвенных измерений оказывает количество экспериментов в серии. Чем больше экспериментов в серии, тем точнее значение измеряемой величины и погрешность меньше. Для минимизации погрешностей измерений целесообразным является использование более точных приборов с меньшей систематической погрешностью, увеличение количества экспериментов, введение поправок (поправкой называют величину, которую надо прибавить к результату измерения с целью исключения систематической погрешности), а также использование методов замещения и компенсации по знаку.

### 1.9 Использование результатов исследований

С применением полученных в настоящей работе экспериментальных данных, соответствующих кривых и аппроксимационных выражений можно управлять процессами взрывного дробления капель при различных условиях. Это создает предпосылки применения результатов настоящей работы не только для развития современной теории двухфазных и многокомпонентных

потоков, но и способствует развитию двух групп технологий: повышение эффективности сжигания жидких и суспензионных топлив, а также повышение ресурсоэффективности технологий термической и огневой очистки жидкостей от нерегламентированных примесей.

Процессы микро-взрыва и диспергирования двух-, трех- и многокомпонентных капель топлив позволяют обеспечить их интенсивное вторичное измельчение до нескольких сотен и даже десятков микрометров. Это приводит к кратному росту площади поверхности испарения и химического реагирования, тем самым снижению инерционности зажигания топливных композиций, повышению полноты их выгорания, минимизации расхода топлива, а также равномерному распылению топлива в камере сгорания.

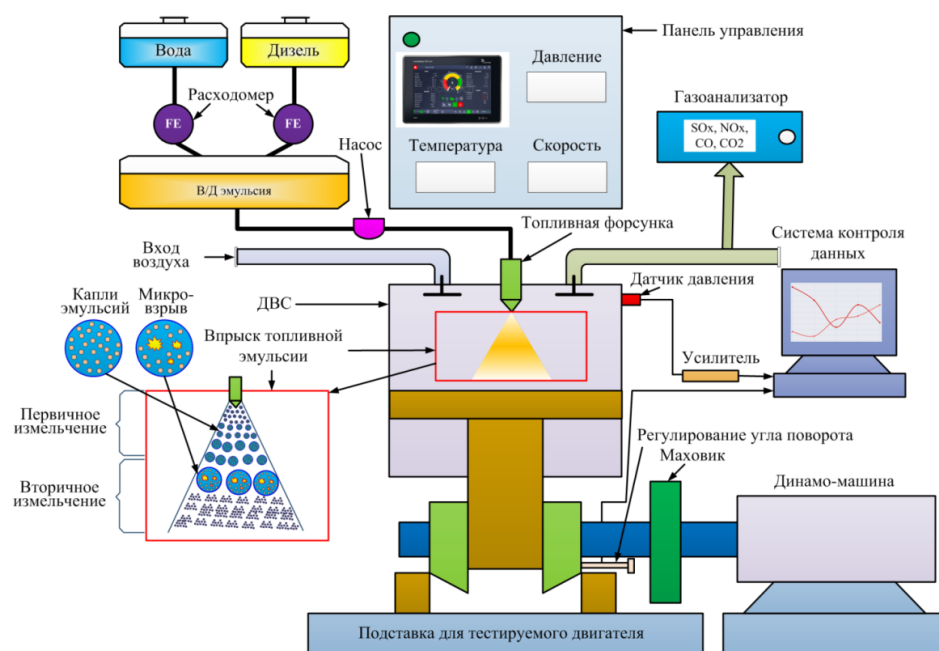
Из анализа результатов экспериментов и литературы можно сделать вывод о больших перспективах снижения затрат на розжиг топлив и повышение полноты их выгорания за счет дробления капель и частиц, входящих в состав топлив. В частности, уменьшение размеров капель и частиц в 2...3 раза приводит к снижению температур зажигания на 60...110 °С, а также время задержки зажигания на 40...70 % (иногда даже выше, чем в 2 раза). При адекватной локальной донастройке соответствующих технологических узлов можно обеспечить значительное повышение эффективности стадий испарения, зажигания и выгорания топлив с разной дисперсностью впрыскиваемого капельного аэрозоля.

## 2 ПРОЕКТИРОВАНИЕ АСУ ПОДГОТОВКИ И СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА В ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ С МИКРО-ВЗРЫВНОЙ ФРАГМЕНТАЦИЕЙ КАПЕЛЬ ТОПЛИВА

### 2.1 Системный анализ объекта автоматизации

В качестве объекта автоматизации в данной работе выбран лабораторный стенд дизельного ДВС, предназначенного для сжигания топливных эмульсий в условиях вторичного измельчения. На рис. 2.1 представлена схема экспериментального стенда и показаны основные элементы данного стенда. Данный стенд разработан по прототипу существующего экспериментального стенда [7]. Основным элементом является двигатель внутреннего сгорания (ДВС) марки Kirloskar (KOEL, India). Данный двигатель является одноцилиндровым, четырехтактным, с прямым впрыском топлива, с воспламенением от сжатия.

Дизельные двигатели существенно отличаются по конструкции, принципу действия и режимам функционирования от бензиновых двигателей. У дизельного ДВС отсутствуют свечи зажигания и, соответственно, воспламенение топливно-воздушной смеси происходит от сжатия. При этом, воздух и топливо подаются отдельно в камеру сгорания посредством форсунок. Также следует отметить, что практически ни один современный дизельный двигатель не обходится без системы наддува, которая используется для повышения рабочих характеристик агрегата. Для оптимизации наддува в максимально широком диапазоне оборотов используются турбоагрегаты с изменяемой геометрией. Дизельный агрегат имеет более высокий коэффициент полезного действия и выдает больший крутящий момент при низких оборотах по сравнению с типичным бензиновым ДВС с аналогичными характеристиками.



*a*



*б*

Рисунок 2.1 – Схема (а) и внешний вид [7] (б) экспериментального стенда на основе дизельного ДВС, предназначенного для сжигания топливных эмульсий в условиях вторичного измельчения капель топлива

Цикл работы лабораторной установки состоит из нескольких этапов. На первом этапе в свободные баки для горючей и химически инертной жидкости заливаются соответственно дизельное топливо и вода до заданного уровня, который необходимо поддерживать для безопасной и постоянной работы ДВС. С использованием датчиков расхода, а также программируемого

логического контроллера (ПЛК) определяются соотношения компонентов в топливной эмульсии. Данные соотношения компонентов определяются оператором и в лабораторных условиях являются значениями, полученными экспериментальным путем для различных режимов работы. Далее подготовленная смесь из двух компонентов перемешивается в камере смешения с использованием ультразвуковой ванны. Стабилизация полученной топливной смеси осуществляется посредством использования эмульгаторов, которые заранее добавляются либо в горючий, либо химический инертный компонент в зависимости от соотношения компонентов. Приготовленная топливная смесь через специальные каналы подачи жидкости и форсуночное устройство попадает в камеру сгорания ДВС. Одновременно с подачей топливной эмульсии реализуется подача воздуха (окислителя). В камере сгорания происходит зажигание топливной смеси. На выходе камеры сгорания установлена выхлопная труба, вредные выбросы из которой выходят из лаборатории через нагнетательную систему. Анализ концентраций вредных выбросов осуществляется посредством газоанализатора.

В таблице 2.1 приведены основные характеристики двигателя марки Kirloskar AV-1, используемого в качестве прототипа. Массовый расход воздуха определяется путем измерения перепада давления, регистрируемого датчиком разности давлений, который синхронизируется с цифровым электронным управлением. Количество оборотов в минуту вала двигателя рассчитывается по показаниям датчика скорости. Расход топлива определяется и контролируется с использованием расходомеров по методу переменного перепада давления. Измерение температуры в камере сгорания осуществляется с использованием термопар. Контроль состава дымовых газов и вредных выбросов осуществляется с использованием газоанализатора.

Таблица 2.1 – Основные характеристики двигателя

Марка	Kirloskar AV-1
Описание	Одноцилиндровый, четырехтактный, прямой впрыск, двигатель с воспламенением от сжатия
Диаметр цилиндра	80 мм
Высота цилиндра	110 мм
Коэффициент сжатия	16:1
Давление впрыска	200 бар
Диаметр отверстия форсунки	0,3 мм (3 отверстия)
Номинальная мощность	3,7 кВт
Номинальная частота	25 об./с
Рабочий объем двигателя	554 см <sup>3</sup>
Тип охлаждения	Водяное

Датчики температуры и давления установлены в характерных точках контроля параметров лабораторного стенда. Датчики температуры измеряют температуру на входе и выходе системы водяного охлаждения, в самой камере сгорания, в выхлопной системе отработавших газов и масляной смазки. В каждой измеряемой области реализуется взаимное резервирование датчиков для повышения надежности систем автоматизации.

Датчики давления установлены непосредственно в ДВС для измерения давление внутри цилиндра, а также для измерения давления при впрыске топлива. Датчик положения используется для измерения угла поворота коленчатого вала. Сигналы со всех датчиков посредством программируемого логического контроллера поступают на автоматизированное рабочее место оператора, где отображается информация о технологическом процессе, необходимая для оперативного управления процессом оператором.

Задача автоматизированного управления лабораторным стендом дизельного ДВС сводится в основном к необходимости поддержания

материального и энергетического балансов в условиях стационарных и переходных режимов.

Основное назначение ДВС – обеспечение режима вторичного измельчения капель за счет физических эффектов, приводящих к экономичности и экологичности процесса горения, снижению затрат энергии на этапах прогрева, испарения и зажигания топливных эмульсий.

Основное назначение АСУ – это управление процессом: автоматический режим (ПЛК), супервизорный режим (сигнал задания на ПЛК подается с АРМ оператора) в условиях диспетчеризации оператором удаленного объекта.

В дизельный ДВС топливная эмульсия подается при помощи форсуночного устройства, представленного схематично на рисунке 2.2. Топливная эмульсия формируется в специальном баке, где поддерживается постоянная концентрация горючего и химически инертного компонента и поддерживается седиментационная стабильность топливной эмульсии. Далее приготовленная эмульсия поступает по топливопроводу в форсунку. Затем эмульсионное топливо первично измельчается до размеров (радиусов) 100...500 мкм и за счет эффектов вторичного измельчения уменьшается в размерах (радиусах) в 10...20 раз. Эффекты вторичного измельчения зависят главным образом от двух факторов: от соотношения концентраций горючего и химически инертного компонента и от температуры греющей среды.

Получение информации о соотношениях концентраций горючего (дизеля) и химически инертного (воды) компонентов топливной эмульсий реализуется с помощью датчиков расхода. Далее с использованием ПЛК происходит регулирование и управление соотношений концентраций посредством исполнительного механизма и регулирующего органа. Во избежание работы двигателя без топлива при проектировании лабораторного стенда предусмотрены датчики уровня в баке с водой, дизелем и приготовленной эмульсией. Также при подаче топлива в ДВС ведется контроль подачи воздуха с использованием датчика массового расхода.



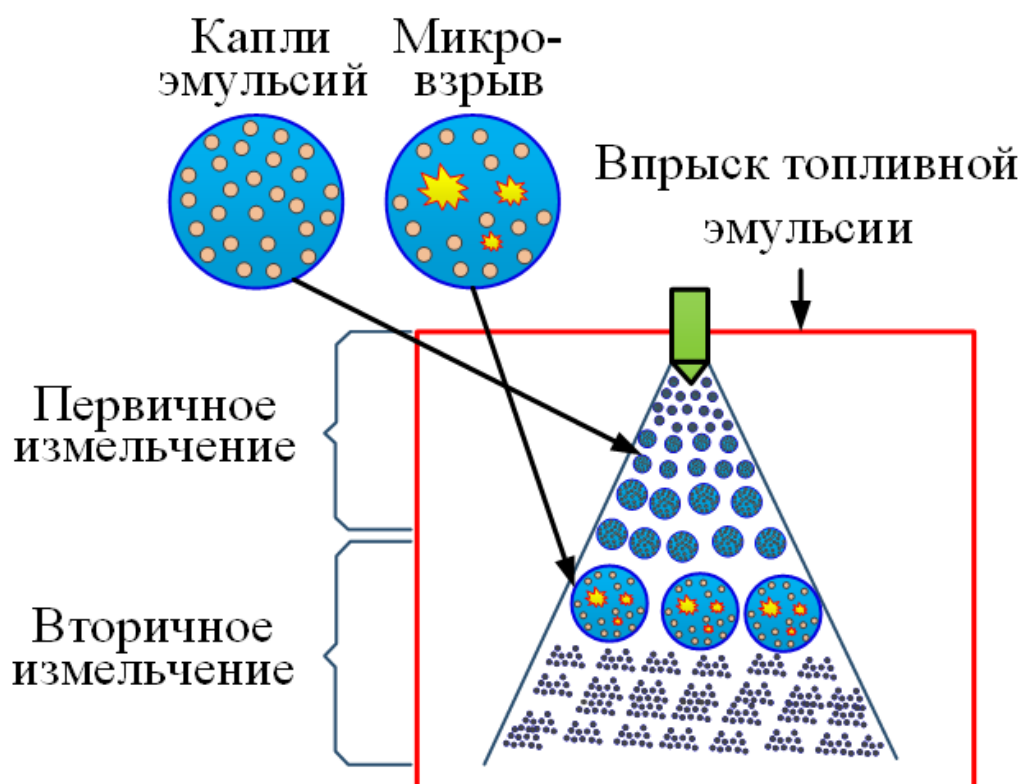


Рисунок 2.2 – Схема подачи топливной эмульсий в камеру сгорания дизельного ДВС

Основные свойства горючего и негорючего компонентов, используемых при приготовлении топливных эмульсий, представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Основные характеристики компонентов топливной эмульсии [6]

Компоненты	$\lambda$ , Вт/(м·°C)	$C$ , Дж/(кг·°C)	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\mu$ , Па·с	$\sigma$ , Н/м
Вода	0,6	4200	1000	0,0198	0,072
Дизельное топливо	0,117	1873	879	0,001004	0,008

**Примечание:**  $\lambda$  – теплопроводность, Вт/(м·°C);  $C$  – теплоемкость, Дж/(кг·°C);  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu$  – динамическая вязкость, Па·с;  $\sigma$  – поверхностное напряжение, Н/м.

## 2.2 Анализ нормативных документов

С использованием базы данных «КОДЕКС» выполнен поиск и анализ нормативных документов, касающихся общих и технических требований, предъявляемых к двигателем внутреннего сгорания, а также требования к автоматизации при их эксплуатации. В ГОСТ Р 53638-2009 [42] представлены общие технические условия для двигателей внутреннего сгорания. Настоящий стандарт распространяется на судовые, тепловозные и промышленные двигатели, работающие на жидком и/или газообразном топливе. В зависимости от назначения двигателя в техническом задании и технических условиях на двигатели конкретного типа устанавливают следующие виды мощностей: длительную (номинальную); мощность перегрузки (максимальную); мощность на упоре топливной рейки (полную); минимальную, допускаемую при длительной работе двигателя; мощность, соответствующую минимально устойчивой частоте вращения; минимальную мощность заднего хода (для судовых двигателей). Допускается по согласованию изготовителя с потребителем (заказчиком) в технических заданиях и технических условиях на двигатели конкретного типа устанавливать дополнительные виды мощностей. В зависимости от объявленной мощности двигателя устанавливают: частоту вращения, соответствующую длительной мощности (номинальной), мощности перегрузки (максимальной) или мощности на упоре топливной рейки (полной); минимально устойчивую частоту вращения под нагрузкой; минимально устойчивую частоту вращения холостого хода; максимальную частоту вращения (при необходимости); частоту вращения, соответствующую мощности заднего хода.

Двигатели должны быть автоматизированы или по согласованию изготовителя с потребителем (заказчиком) подготовлены (приспособлены) к автоматизации. Степень и объем автоматизации устанавливают по ГОСТ 14228 [43] в техническом задании и технических условиях на двигатели

конкретного типа. Двигатель следует оборудовать регулятором частоты вращения, соответствующим назначению двигателя и обеспечивающим параметры системы автоматического регулирования частоты вращения по ГОСТ 10511 [44]. По согласованию изготовителя с потребителем (заказчиком) двигатели приспособливают для установки диагностических устройств. По согласованию изготовителя с потребителем (заказчиком) двигатели должны быть приспособлены для оборудования микропроцессорными системами управления, регулирования, контроля и диагностирования. Системы охлаждения и смазки двигателя следует оборудовать терморегуляторами. Автоматическое регулирование температуры должно обеспечивать поддержание регулируемых температур жидкостей в системах охлаждения и смазки двигателя в пределах общей неравномерности, значение которой при изменении нагрузки от 25 до 100 % и изменении температур забортной воды или наружного воздуха должно быть не более 12 К для двигателей с водоводяным охлаждением и не более 18 К – с водовоздушным охлаждением.

Показатели ограниченной применимости по ГОСТ 4.367 [45], а также показатели средний ресурс, гамма-процентный ресурс, средний срок службы, гамма-процентный срок службы, гамма-процентный срок сохраняемости применяют по согласованию изготовителя с потребителем (заказчиком).

Значения установленной безотказной наработки (назначенного ресурса непрерывной работы), назначенного ресурса до переборки, назначенного ресурса до капитального ремонта, назначенного срока службы до списания устанавливают по согласованию изготовителя с потребителем (заказчиком) в технических заданиях и технических условиях на двигатели конкретного типа.

Признаками отказа двигателя являются: вынужденная остановка двигателя в период между плановыми видами технического обслуживания и ремонта или неплановый ремонт; отклонение заданных показателей за допустимые пределы, установленные технической документацией.

В ГОСТ Р ИСО 8178-5-2017 [46] представлена информация по требованиям к измерению выбросов продуктов сгорания. Поскольку свойства

топлив в разных странах мира могут очень сильно отличаться, в настоящий стандарт включен обширный список как эталонных, так и коммерческих видов топлива. Данный стандарт определяет виды топлива, рекомендуемые при проведении стендовых испытаний, с целью измерения содержания вредных выбросов с отработавшими газами по испытательным циклам, регламентируемых стандартом ИСО 8178-4 [47].

## 2.3 Разработка структуры КТС автоматизированной системы управления

### 2.3.1 Определение перечня функций, архитектуры и состава комплекса технических средств АСУ

Функции АСУ ТП обширны и подбираются к конкретному объекту автоматизации отдельно. Принято все функции АСУ ТП разделять на три категории: информационные, управляющие (основные) и вспомогательные функции.

К информационным функциям, касающихся АСУ лабораторным стендом дизельного ДВС, относятся: сбор информации о технологических параметрах и состоянии оборудования; фильтрация входных сигналов от высокочастотных помех измерения; пересчет электрических сигналов в физические величины; контроль технологических параметров на физическую достоверность, на соответствие технологическому регламенту, на достижение аварийных границ; косвенные измерения параметров (получение оценки технологического параметра, который непосредственно не измеряются, в результате математической обработки измеряемых сигналов, функционально связанных с этим параметром); оценка состояния оборудования; ручной ввод информации в систему с использованием пульта оператора или клавиатуры; обмен информацией между вычислительными средствами АСУ ТП (контроллеры, станции распределенной периферии, рабочие и инженерные станции, серверы); формирование и выдача сигналов световой и звуковой сигнализаций; визуализация информации в удобном для оперативного

персонала виде; архивирование информации о ходе технологического процесса, о нарушениях технологического регламента, о возникновении аварийных ситуаций; ведение базы данных реального времени; обмен данными со смежными и вышестоящими системами управления; формирование сменных и суточных отчетов.

К управляющим функциям АСУ лабораторным стендом дизельного ДВС относятся функции, результатами которых является выработка и реализация управляющих воздействий на объект управления. Управляющими функциями АСУ лабораторным стендом дизельного ДВС являются: определение и реализация оптимального режима функционирования каждого из технологических агрегатов; стабилизация технологических параметров (давлений, температур, уровней); программное управление изменением технологических параметров (реализация заданного графика изменения температуры в камере сгорания); логическое управление оборудованием (например, при достижении заданного уровня воды в емкостях с водой и топливом следует выключить питательные насосы); пуск и останов отдельных агрегатов и технологической линии в целом; аварийное отключение (например, отсечка подачи топлива в ДВС при достижении критических температур); выдача оператору рекомендаций по управлению процессом (например, «Рекомендуется снизить подачу воды для улучшения характеристик вторичного измельчения»).

Вспомогательные функции АСУ ТП состоят в контроле функционирования технических и программных средств самой системы автоматизации. Контроллеры, станции распределенной периферии, панели оператора, инженерные станции, SCADA системы имеют в своем составе развитые средства диагностики.

Выбор архитектуры АСУ ТП существенным образом определяется техническими требованиями, предъявляемыми к объекту автоматизации. В данной работе объектом автоматизации является лабораторный стенд ДВС.

Архитектура АСУ лабораторным стендом дизельного ДВС представлена на рисунке 2.3.



Рисунок 2.3 – Архитектура АСУ лабораторным стендом дизельного ДВС

На нижнем уровне АСУ расположены первичные преобразователи, которые служат для получения информации о физических параметрах технологического процесса. Основными контролируемыми параметрами являются: расход воды, расход топлива (дизеля), расход воздуха, концентрации  $SO_x$ ,  $NO_x$ ,  $CO$ ,  $CO_2$  в выхлопных газах, давление, температура, положение, уровни в баках с водой, дизелем и топливной эмульсией. Средний уровень представлен микропроцессорными ТСА – контроллерами, регуляторами, которые реализуют функции управления / регулирования. На верхнем уровне находится средства ввода / вывода информации, ее хранение и отображение. На верхнем уровне располагается основной сервер для хранения информации о технологических процессах и параметрах, информация об этом дублируется и хранится на резервном сервере. Резервирование информации обеспечивают более надежную эксплуатацию оборудования. Также для улучшения надежности наиболее значимые и важные измеряемые параметры (давление, температура) регистрируются с помощью нескольких датчиков (2...3 шт.).

Первичные средства измерения, датчики технологических параметров, аппараты местного управления и сигнализации должны быть размещены на технологическом оборудовании или в непосредственной близости от него, на приборных щитах или в приборных шкафах.

Датчики, устанавливаемые на приборных стойках в обогреваемых помещениях и в обогреваемых приборных шкафах, должны соответствовать виду климатического исполнения по ГОСТ 15150-69\* УХЛ4 [48].

Датчики давления должны выдерживать воздействие односторонней перегрузки давлением, в 1,5 раза превышающим верхний предел измерения, без ухудшения рабочих характеристик.

Конструкция датчиков должна обеспечивать проведение калибровки и поверки измерительного канала в комплекте с датчиком по месту эксплуатации.

Технические средства среднего уровня должны обеспечивать:

- сбор информации от преобразователей сигналов нижнего уровня;
- фильтрацию, линеаризацию и масштабирование входных аналоговых сигналов;
- автоматический контроль и управление оборудованием;
- передача информации и состоянии оборудования на верхний уровень системы автоматизации.
- Верхний уровень должен обеспечивать:
  - прием и отображение информации со среднего уровня;
  - мониторинг и оперативное управление лабораторным процессом;
  - архивацию событий на нижнем уровне и действий оператора;
  - контроль и управление работой по каналам связи.

На АРМе должен быть предусмотрен контроль прав пользователей на доступ к данным и функциям системы, таким как запуск и останов приложений, отправка команд управления и регулирования, ввод значение сигналов и их свойств. Должны быть реализованы следующие уровни доступа:

- администратор – доступна функция администрирования системы;

- инженер – доступна функция изменения уставок и шкал, маскирования параметров готовности и защит, имитации и стимулирования;
- диспетчер (оператор) – доступна функция управления оборудованием;
- гость – доступен просмотр видеокадров.

Более высокий уровень доступа включает в себя все функции нижестоящих уровней. Каждый пользователь системы перед началом работы должен зарегистрироваться под собственным паролем.

Как серверная, так и клиентская части систем безопасности должны интегрироваться в систему безопасности операционной системы и позволять использовать в работе данные учетных записей пользователей операционной системы.

Для передачи данных между уровнями используется сеть Ethernet. Основной и резервный каналы передачи данных используют различные кабели и приходят на различные блоки для соединения.

Технические средства АСУ ТП относятся к электроприемникам особой группы I категории надежности электроснабжения. Электропитание должно осуществляться от сети переменного тока напряжением (220+22) В и частотой (50+0,4) Гц. Электропитание должно производиться от двух секций с организацией АВР.

### 2.3.2 Проектирование структурных схем КТС измерительных каналов на лабораторном стенде дизельного ДВС

В данном разделе разработаны структурные схемы типичных измерительных каналов температуры, давления, расхода, уровня, концентрации газов/паров. На рисунке 2.4 представлена соответствующая упрощенная структурная схема измерительных каналов: температуры; давления; расхода; уровня; концентрации газов/паров.



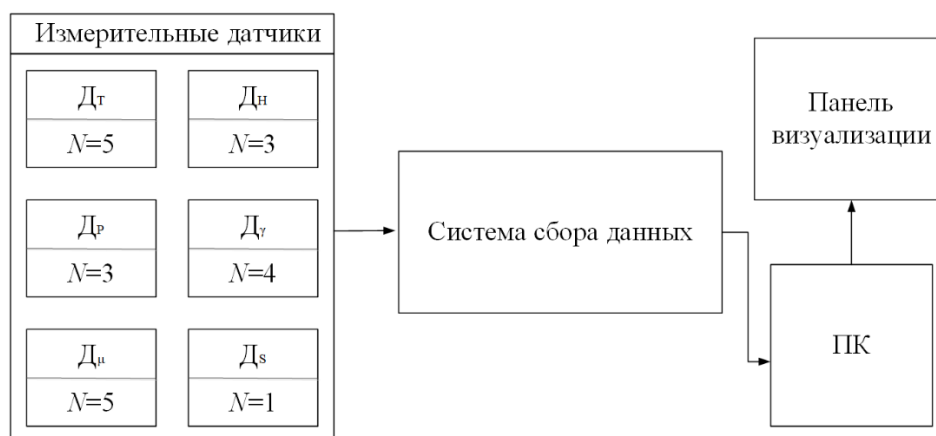


Рисунок 2.4 – Упрощенная структурная схема измерительных каналов:  
температуры; давления; расхода; уровня; концентрации газов/паров;  
положения

Требования к измерительным каналам представлены ниже:

- сохранение работоспособности и внешнего вида после воздействия на него испытательных механических факторов, возникающих при транспортировании согласно ГОСТ 23170 [49];
- сохранение работоспособности при температуре окружающей среды от плюс 5 до плюс 40 °С;
- сохранение работоспособности при воздействии относительной влажности воздуха 75 % при температуре плюс 30 °С;
- оборудование измерительных каналов должны быть виброустойчивыми к воздействию вибраций;
- измерительный канал должен быть устойчив к воздействию внешних магнитных полей, постоянных или переменных, с частотой сети с напряженностью до 400 А/м согласно ГОСТ Р 50648-94 [50];
- оборудование системы измерительного канала должно быть устойчиво к воздействию наносекундных импульсных помех в сети электропитания, соответствующих степени жесткости 3 испытаний по ГОСТ Р 51317.4.4-2007 [51].
- искробезопасность электрической цепи (на участке нижний – средний уровни АСУ). Провода, соединяющие искробезопасные барьеры с

клеммной колодкой, предназначенной для подключения искробезопасных цепей, должны укладываться в отдельные лотки и закрываться крышкой, поставляемой в комплекте с лотком. На крышку лотка должна быть нанесена маркировка ИБЦ;

- необходимость «раздвоения» сигнала, поступающего на средний уровень от измерительного преобразователя.

### 2.3.3 Техническое задание на проектирование и разработку АСУ лабораторного стенда дизельного ДВС

#### *1. Общие сведения*

Данное техническое задание составлено на проектирование и разработку АСУ лабораторного стенда дизельного ДВС. Лабораторный стенд предназначен для исследования эффектов вторичного измельчения двухжидкостных капель при распылении в двигателе внутреннего сгорания. АСУ выполнена на базе контроллера с реализацией диспетчеризации процесса.

#### *2. Назначение*

Управление процессом распыления и вторичного измельчения двухжидкостных капель: автоматический режим (ПЛК), супервизорный режим (сигнал задания на ПЛК подается с АРМ оператора) в условиях диспетчеризации оператором удаленного объекта.

#### *3. Основные технические характеристики*

В состав лабораторного стенда дизельного ДВС входят: баки для хранения горючего и негорючего компонента вододизельной эмульсии, а также бак для хранения самой эмульсии; топливная форсунка; каналы подачи воздуха, а также водотопливной эмульсии; дизельный ДВС фирмы Kirloskar AV-1; газоанализатор; датчики температуры, давления, расхода, уровня, положения, концентрации паров/газов; панель управления; АРМ со SCADA; кнопки и ключи управления, сигнальная аппаратура; щит управления с ПЛК.

#### *4. Требования к ТСА нижнего уровня автоматизации*

В состав нижнего уровня АСУ ТП входят первичные средства измерения, датчики технологических параметров, аппараты местного управления и сигнализации должны быть размещены на технологическом оборудовании или в непосредственной близости от него, а приборных щитах или в приборных шкафах.

Датчики, устанавливаемые на приборных стойках в обогреваемых помещениях и в обогреваемых приборных шкафах, должны соответствовать виду климатического исполнения по ГОСТ 15150-69\* категории УХЛ4 [48].

Датчики давления должны выдерживать воздействие односторонней перегрузки давлением в 1,5 раза превышающим верхний предел измерения, без ухудшения рабочих характеристик.

Конструкция датчиков должны обеспечивать проведение калибровки и поверки измерительного канала в комплекте с датчиком по месту эксплуатации.

#### *5. Требования к ТСА среднего уровня автоматизации*

Техническими средствами среднего уровня являются программно-технические комплексы (микропроцессорные контроллеры, устройства связи с объектом).

Технические средства среднего уровня должны обеспечивать:

- сбор информации от преобразователей сигналов нижнего уровня;
- фильтрацию, линеаризацию и масштабирование входных аналоговых сигналов;
- автоматический контроль и управление оборудованием;
- передачу информации о состоянии оборудования на верхний уровень автоматизации.

БРУ предназначен для обеспечения подачи следующих команд, минуя микропроцессорные средства автоматизации: аварийного отключения; отключения подпорных насосных агрегатов; управления задвижками подключения.

БРУ должен быть выполнен в соответствии с ОТТ-35.240.50-КТН-187-06 «Свод обязательных требований при проектировании и изготовлении микропроцессорных систем автоматизации» [52].

В составе БРУ должна быть предусмотрена световая сигнализация:

- состояния высоковольтных выключателей (включен, отключен);
- положение задвижек подключения (открыта, закрыта).

УСО должен быть выполнен по блочно-модульному принципу, который позволяет производить необходимую комплектацию в соответствии с решаемыми задачами. Шкаф должен иметь полный набор аппаратных средств (центральное процессорное устройство (основное и резервное), центральное процессорное устройство контроллера связи, модули ввода-вывода, блоки питания, силовые модули, сетевое оборудование и т.д.), необходимых для решения задач АСУ ТП.

#### *6. Требования к ТСА верхнего уровня автоматизации*

Верхний уровень АСУ ТП должен обеспечивать прием и отображение информации со среднего уровня; мониторинг и оперативное управление процессом; архивацию событий на нижнем уровне и действий оператора; контроль и управление работой по каналам связи.

Все АРМ должны поставляться комплектно с системным, офисным и прикладным ПО.

На верхнем уровне предусмотрен 1 АРМ и 1 сервер.

#### *7. Требования к метрологическим характеристикам*

Средства измерения, составляющие измерительные каналы должны быть первично поверены или калиброваны; внесены в Государственный реестр средств измерений; иметь свидетельство об утверждении типа измерений и методики поверки, регламентированные в приложении к данному свидетельству и оформленные в соответствии с действующими нормами и правилами.

Измерительными каналами с нормируемыми метрологическими характеристиками являются входные каналы от измерительных

преобразователей с унифицированным токовым сигналом 4...20 мА (включая искробезопасные цепи); входные каналы для подключения термопреобразователей сопротивления; аналоговые выходные каналы 4...20 мА.

#### *8. Требования к надежности*

Лабораторный стенд дизельного ДВС относится к многофункциональному, многоканальному восстанавливаемому изделию. Вероятность безотказной работы согласно ГОСТ 27889-88 [53] по каждой функции, с учетом резервирования контуров, должна составлять за 2000 часов, не менее: по функциям автоматической защиты – 0,98; по функциям управления – 0,92; по измерению и отображению информации – 0,9. Отказом функции защиты считается невыполнение или неправильное выполнение переключения оборудования при наличии аварийной ситуации (выход контролируемого параметра за пределы нормы). Отказом функции управления считается невыполнение или неправильное выполнение принятой команды управления. Отказом функции отображения считается невыдача или искажения контролируемого параметра на сопряжении системы автоматизации и устройства отображения информации. Предполагаемый закон распределения вероятности безотказной работы – экспоненциальный (уравнение Аррениуса). Минимальный срок службы – 5 лет.

#### *9. Требования к ПО*

- программное обеспечение должно обеспечивать выполнение всех требований системы;
- программное обеспечение должно сопровождаться комплектом документации, позволяющей осуществлять технологическое конфигурирование алгоритмов ПО на этапе проведения пусконаладочных работ и в процессе промышленной эксплуатации без участия разработчика ПО;
- программное обеспечение должно выполнять логически и вычислительные операции по реализации функций сбора, обработки,

хранения, управления, передачи и представления данных в соответствии с функциями системы автоматизации и включать: общесистемное, прикладное, специальное ПО, пакет программ тестового контроля технических средств, входящих в составы систем автоматизации.

#### 2.3.4 Проектирование структурных схем КТС АСУ на основе микропроцессорной техники

В данном разделе разработана структурная схема КТС АСУ на основе микропроцессорной техники. Разработанная структурная схема и основные сокращения представлены на листе ФЮРА 421000.002 С1.

В состав комплекса технических средств входят следующие технические средства:

- измерительные датчики;
- устройство связи с объектом (УСО);
- коммутаторы;
- автоматизированное рабочее место оператора;
- щит серверный;
- панель визуализации.

НУ – СУ – аналоговые и дискретные сигналы, каждый по двухпроводной линии связи. СУ – ВУ – цифровые сигналы по интерфейсу Ethernet (протокол ТСР/ІР). На нижнем уровне расположены измерительные датчики: датчики давления, уровня, расхода, температуры, положения и т.д. На среднем уровне расположен УСО, содержащий программируемый логический контроллер. На верхнем уровне установлены щит серверный, автоматизированное рабочее место оператора и панель визуализации. Для реализации связи между верхним и средним уровнями автоматизации используются коммутаторы. Вся информация о ходе технологического процесса хранится на сервере, входящем в состав щита серверного, расположенного на верхнем уровне АСУ. Связи между каждым уровнем проложены специальными кабелями.

### 2.3.5 Оценка погрешностей измерительных каналов

Измерительные каналы систем автоматизации могут включать в себя несколько средств измерений различных типов, например, датчики, измерительные преобразователи, модули аналогового и частного ввода и вывода [54]. Погрешность такой системы желательно определять экспериментальным путем [55], однако это не всегда возможно или целесообразно. В таких случаях используют расчётный метод.

Исходными данными для расчета погрешности измерительных каналов являются [56]: метрологические характеристики средств измерений; погрешность метода измерений (методическая погрешность); характеристики влияющих величин (например, окружающая температура, влажность); характеристики измеряемого сигнала.

Оценка погрешности измерительного канала определяется как среднеквадратическое отклонение погрешностей компонентов измерительного канала. Для нормального закона распределения случайных составляющих погрешности от нормирующего значения используют

формулу: 
$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n Y_i^2}.$$

В таблицу 2.3 сведены основные погрешности измерительных каналов в соответствии со структурными схемами (рис. 2.4).

Таблица 2.3 – Основные погрешности измерительных каналов в соответствии со структурными схемами (рис. 2.4)

Измерительный канал	Погрешность
Температура, давление	$\sigma_T = \sqrt{Y_1^2 + Y_2^2}, \sigma_P = \sqrt{Y_1^2 + Y_2^2}$
Расход, уровень	$\sigma_\mu = \sqrt{Y_1^2 + Y_2^2}, \sigma_H = \sqrt{Y_1^2 + Y_2^2}$
Концентрация, положение	$\sigma_\gamma = \sqrt{Y_1^2 + Y_2^2}, \sigma_S = \sqrt{Y_1^2 + Y_2^2}$

## 2.4 Разработка функциональной схемы системы управления

В данном разделе разработана функциональная схема (схема автоматизации) АСУ ТП на основе микропроцессорной техники. В верхней части функциональной схемы показаны технологические объекты, выполненные в условных обозначениях, первичные преобразователи измеряемых технологических параметров и запорная арматура. В нижней части функциональной схемы показаны преобразователи, устанавливаемые по месту, приборы, средства автоматизации и вычислительной техники, установленные на различных щитах. Полная схема представлена на листе с шифром ФЮРА.421000.002 С2.

Функциональная схема систем автоматизации технологических процессов является основным техническим документом, определяющим структуру и характер систем автоматизации технологических процессов, а также оснащения их приборами и средствами автоматизации [57, 58].

Для разрабатываемой функциональной схемы АСУ ТП лабораторного стенда дизельного ДВС должны решаться задачи:

- 1) сбор первичной информации;
- 2) сбор информации о состоянии оборудования;
- 3) сбор информации о регистрируемых параметрах и процессах;
- 4) сбор информации о работе оборудования.

На функциональной схеме оборудование изображается, как правило, упрощено. Но при этом схема должна давать полное представление о работе и взаимодействии частей системы управления. Регулирующая и запорная арматура изображается только та, которая необходима для работы системы автоматизации, а также необходима для определения расположения первичных преобразователей измерений.

При разработке функциональной схемы на первом этапе были определены измерительные каналы (1...4, 6...9) и каналы управления (5, 10...12).



Для измерения температур в двигателе используется канал 1, для измерения температуры в системе охлаждения, температуры масляной смазки, температуры выхлопных газов, температуры в помещении – канал 2. Для измерения давления впрыска топлива и измерения давления в ДВС используется измерительный канал 3. Для измерения расхода воздуха используется измерительный канал 4. По измеренным температурам осуществляется регулирование расхода топливной эмульсии, а также концентраций исходных компонентов (горючего и химически инертного), которые попадают непосредственно в ДВС. Расход исходных компонентов и топливной эмульсии определяется измерительным каналом 4. Информация о расходе поступает к регулирующему устройству в виде унифицированного токового сигнала 4...20 мА с расходомеров переменного перепада давления. Микропроцессорный контроллер формирует дискретный регулирующий сигнал, который поступает на пусковое устройство, где сигнал усиливается и приводит в действие электрический привод исполнительного механизма. Канал 5 передает информацию о работе заслонки на микропроцессорный контроллер. Канал 6 служит для сигнализации расхода компонентов топливной эмульсии и воздуха. Для определения уровня жидкостей в баках с дизельным топливом, водой и топливной эмульсией используется соответственно канал 7. Для определения концентраций вредных выбросов используется газоанализатор (канал 8), фиксирующий значения концентраций углекислого газа, угарного газа, оксидов серы и азота. Для регистрации положения вала ДВС используется измерительный канал 9. Для управления исполнительными механизмами камеры смешения, вытяжного вентилятора и топливного насоса используется канал 10. Также для обеспечения пожарной безопасности используются пожарные и ручные извещатели (каналы 11, 12). На втором этапе разрабатывалась нижняя часть функциональной схемы. В этой части изображались приборы, установленные по месту, пусковой щит аппаратуры и щит управления. В щите управления установлен ПЛК. Сигналы, поступающие на контроллер, также передаются на пульт управления, для

регулировки управляющих воздействий и предотвращения аварийных режимов. Технологическое оборудование на функциональной схеме изображено в соответствии с ГОСТ 21.403-80 [59], условные обозначения запорной арматуры изображены по ГОСТ 2.785-70 [60], первичные и функциональные измерительные приборы – в соответствии с ГОСТ 21.208-2013 [61].

## 2.5 Составление опросных листов на приборы и средства автоматизации

В данном разделе составлены опросные листы на ТСА нижнего, среднего, верхнего уровней автоматизации. Все опросные листы представлены на листах с шифром ФЮРА.421000.002 ОЛ1 – ФЮРА.421000.002 ОЛ16.

Опросные листы выполняют в соответствии с данными предприятий - изготовителей оборудования и комплектуют их в виде отдельного выпуска с наименованием «Опросные листы». Проектированию продукции предшествуют получение или разработка и согласование исходных технических требований (заявок) от заказчика для заключения договора (контракта) на выполнение работы [62]. Исходные технические требования к различным типам оборудования должны соответствовать содержанию опросных листов. Требования, включаемые в опросные листы, содержат информацию: наименование установки; требования государственных надзорных органов; перечень разрешительных документов; ограничения по габаритам; отрасль промышленности; габаритные размеры; номинальное значение измеряемого параметра или диапазон измерений; метрологические характеристики; параметры контролируемой и окружающей среды; способ монтажа и т.д.

## 2.6 Выбор технических средств системы управления, составление спецификации

### 2.6.1 Составление спецификации ТСА

В данном разделе составлена спецификация ТСА нижнего, среднего, верхнего уровней автоматизации. Спецификация представлена на листе ФЮРА.421000.002 ЗС1.

Спецификация оборудования, изделий и материалов – текстовый проектный документ, определяющий состав оборудования, изделий и материалов [63].

Спецификацию оборудования, изделий и материалов составляют ко всем основным комплектам рабочих чертежей. В спецификацию включают все оборудование, изделия и материалы, предусмотренные рабочими чертежами соответствующего основного комплекта. Спецификацию, как правило, составляют по разделам (подразделам), состав которых и последовательность записи в них оборудования, изделий и материалов устанавливаются соответствующими стандартами. В спецификацию не включают отдельные виды изделий и материалы, номенклатуру и количество которых определяет организация, исходя из действующих технологических и производственных норм [63].

### 2.6.2 Выбор ТСА

Система управления теплотехнических параметров должна проектироваться на основе современных средств автоматизации. Также АСУ должна обладать высокой надежностью. Предпочтение должно отдаваться унифицированным системам с однотипными техническими средствами, обеспечивающими взаимозаменяемость, простоту сочетания друг с другом и удобство компоновки на щитах.

Важными параметрами при выборе первичных измерительных преобразователей являются: диапазон измерений и характеристики выходного сигнала. Также необходимо ограничивать количество технических средств, устанавливаемых на щитах, минимальным набором, обеспечивающим выполнение требуемых функций.

Решения по выбору технических средств автоматизации приведены в заказной спецификации, представленной на листе с шифром ФЮРА.421000.002 ЗС.

**Выбор датчиков температуры.** В разрабатываемой автоматизированной системе управления лабораторным стендом дизельного ДВС регистрируется температура в ДВС (3 датчика), температура в системе охлаждения (2 датчика), температура в системе смазки (1 датчик), температура выхлопных газов (1 датчик) и температура окружающей среды (1 датчик).

Главными требованиями для датчиков температуры, используемых для измерения температуры в системе лабораторного стенда дизельного ДВС, являются диапазон измерения, цена, качество и надежность. Для измерения температуры в ДВС используются термопары типа К (хромель-алюмель) с цифровым индикатором и диапазоном измерения до 1250 °С. Для измерения температуры системы охлаждения, масляной смазки, выхлопных газов и окружающей среды используются термопары типа К (хромель-алюмель) с цифровым индикатором и диапазоном измерения до 600 °С.

В данной системе управления лабораторным стендом дизельного ДВС предполагается установка восьми датчиков температуры. Рассмотрим характеристики нескольких датчиков температуры, выпускаемых отечественными производителями «Метран» и «Овен». Каталоги продукции у производителей «Метран» и «Овен» представлены в [64, 65]. В таблице 2.4 представлены основные технические характеристики термопар для измерения температуры в камере сгорания дизельного ДВС. Требуемый диапазон измерения 800...1200 °С. Для измерения температуры в камере сгорания используются три датчика температуры.

Таблица 2.4 – Основные технические характеристики термопар для измерения температуры в камере сгорания дизельного ДВС

Наименование	НСХ	Диапазон измерения	Выходной сигнал	Класс допуска	Цена, руб.
Овен ДТПК 01	К (ХА)	(-40...+1250 °С)	4...20 мА	2	от 14000
Метран-281	К (ХА)	(-40...+1000 °С)	4...20 мА	2	от 6000
Метран-2700	К (ХА)	(-40...+1000 °С)	4...20 мА	2	от 15000

Выберем датчик типа Овен ДТПК 01 (длина монтажной части составляет 200 мм), поскольку выходным сигналом данного датчика является унифицированный токовый сигнал, а также то, что он дешевле, чем остальные аналоги, удовлетворяющие требованиям опросного листа. Кроме того, термопреобразователи с унифицированным выходным сигналом Овен ДТПК 01 имеют вид взрывозащиты «искробезопасная электрическая цепь» и предназначены для установки и работы во взрывоопасных зонах помещений и наружных установок. Выберем 3 термопары типа Овен ДТПК 01. НСХ, диапазон измерения температур, выходной сигнал представлены в таблице 4.

Для измерения температуры системы охлаждения, масляной смазки, выхлопных газов и окружающей среды необходимы датчики температуры с диапазоном измерения 0...120 °С. В таблице 2.5 представлены основные технические характеристики термопар.

Таблица 2.5 – Основные технические характеристики термопар для измерения температуры системы охлаждения, масляной смазки, выхлопных газов и окружающей среды

Наименование	НСХ	Диапазон измерения	Выходной сигнал	Класс допуска	Цена, руб.
Овен ДТПК 015	К (ХА)	-40...800 °С	4...20 мА	2	от 800
Метран-252	L (ХК)	-40...600 °С	4...20 мА	2	от 2700
Овен ДТПК075Е	К (ХА)	-40...800 °С	4...20 мА	2	от 10000

Выберем датчики типа Овен ДТПК 015 (длина монтажной части 100 мм), поскольку выходным сигналом данного датчика является унифицированный токовый сигнал, а также он намного дешевле аналогов. Выберем пять датчиков типа Овен ДТПК 015. Преобразователи термоэлектрические ОВЕН ДТПК со встроенным высокоточным нормирующим преобразователем предназначены для измерения и непрерывного преобразования температуры твердых, жидких, газообразных и сыпучих веществ в унифицированный выходной сигнал постоянного тока 4...20 мА. В состав термопреобразователей входят: первичный преобразователь (термозонд) – преобразователь термоэлектрический (ДТП); измерительный преобразователь ОВЕН НПТ-3, установленный в головку датчика. Использование в составе изделия микропроцессорного высокоточного нормирующего преобразователя ОВЕН НПТ-3 позволяет устанавливать через USB-интерфейс любой диапазон измерения температуры в пределах диапазона измерения соответствующего термозонда. Применение термопар с унифицированным токовым выходом 4...20 мА позволяет сделать линию связи более надежной, так как электромагнитные помехи не оказывают серьезного влияния на токовые сигналы в отличие от милливольтовых сигналов от термопар.

**Выбор датчиков давления.** Для контроля давления в ДВС и контроле давления впрыска топливной эмульсии необходимо установить датчики давления. Главным критерием при выборе данных датчиков является максимальное давление 15 МПа. В таблице 2.6 представлены основные технические характеристики датчиков давления.

Таблица 2.6 – Основные технические характеристики датчиков давления

Наименование	Тип	Диапазон измерения	Выходной сигнал	Степень защиты	Цена, руб.
Датчик давления ПД100 модель 115	Измерение избыточного давления	от 16 кПа до 25 МПа	4...20 мА	IP65	От 10500
Датчик давления ПД100 модель 115-Exd	Измерение избыточного давления в сложных условиях эксплуатации	от 16 кПа до 25 МПа	4...20 мА	IP65	От 11340

Анализируя два представленных варианта и необходимые пределы измерений можно сделать вывод что подходят все варианты, но так как рабочая среда является агрессивной, выбираем ПД100 модель 115-Exd, так как он применяется при работе с агрессивными средами. Достоинствами данной технологии являются высокая стабильность, низкий гистерезис, высокая перегрузочная способность и высокая чувствительность – соответственно, точность преобразования.

**Выбор датчиков расхода.** Для измерения количества сжигаемого топлива необходимо установить расходомер в магистрали подачи топлива, а также в магистрали исходных компонентов (воды и дизельного топлива). Вторая группа датчиков необходима для контроля концентраций горючего и химически инертного компонента в готовой топливной смеси. Также датчик расхода устанавливается в магистраль подачи воздуха для контроля концентрации окислителя, поступающего в ДВС. Датчики расхода работают по разному принципу и имеют разные характеристики. Согласно опросным листам и системному анализу объекта автоматизации для лабораторного стенда дизельного ДВС необходимо использовать датчики расхода, основанные на принципе переменного перепада давления. В таблице 2.7

представлены основные технические характеристики расходомеров переменного перепада давления.

Таблица 2.7 – Основные технические характеристики расходомеров переменного перепада давления

Наименование	Тип датчика	Измеряемые среды	Выходной сигнал	Степень защиты	Цена, руб.
Расходомер Метран 350	Расходомер переменного перепада давления	жидкость, газ, пар	4...20 мА	IP65	От 5000
Расходомер Метран 150RFA	Расходомер переменного перепада давления	жидкость, газ, пар	4...20 мА	IP65	От 10000

Выбираем расходомер типа Метран 350. Так как данный расходомер удовлетворяет всем требованиям и условиям эксплуатации, а также является наиболее дешевым. Расходомеры на базе Метран 350 предназначены для измерения расхода жидкости, газа, пара в системах автоматического контроля, регулирования и управления технологическими процессами в различных отраслях промышленности.

**Выбор датчиков уровня.** Датчики уровня устанавливаются баках с горючей и химически инертной жидкостью, а также в баке с готовой топливной смесью. На рынке большое количество разнообразных датчиков уровня. Рассмотрим датчики уровня ДУЕ-10.2 и LMK 331. Технические характеристики датчиков уровня приведены в таблице 2.8.



Таблица 2.8 – Технические характеристики датчиков уровня

Наименование	Рабочий диапазон температур	Материал	Степень защиты от пыли и влаги
Датчик уровня ДУЕ-10.2	от -50 до +85 °С	12Х18Н10Т	IP 67
Датчик уровня ЛМК 331	от 25...+135 °С	Сенсор: керамический тензорезистивный	IP 65-68

Проведя сравнение данных датчиков можно сделать вывод, что ЛМК 331 имеет меньшую погрешность, а также возможность применения в агрессивных средах. В системе необходимо 3 датчика уровня для измерения уровня в баках с горючей и химически инертной жидкостью, а также в баке с готовой топливной смесью. Модель датчика ЛМК 331 специально разработана для проведения контрольных измерений в технологических процессах. Благодаря применению керамического сенсора датчик устойчив к воздействию агрессивных сред.

**Выбор газоанализатора.** Для контроля качества процесса горения в системе предусмотрена установка газоанализатора для контроля содержания кислорода в дымовых газах, а также вредных выбросов. Рассмотрим два типа газоанализаторов [66, 67]:

- газоанализатор фирмы «АГАВА» типа АКГ-МП-2П;
- газоанализатор фирмы «ЭКСИС» типа МАГ-6 Т-8-В-16А.

Технические характеристики данных технических средств измерения концентраций газов в выхлопной трубе представлены в таблице 2.9.

Проведя анализ технических характеристик измерения концентраций выхлопных газов, делаем вывод о том, что газоанализатор типа АКГ-МП-2П подходит для измерения содержания концентраций выхлопных газов. Выбор обусловлен его ценой, а также резервным измерительным каналом.

Таблица 2.9 – Технические характеристики технических средств измерения концентраций газов в выхлопной трубе

Наименование	Измеряемые газы	Количество каналов измерения	Выходной сигнал	Цена, руб.
Многокомпонентный газоанализатор МАГ-6 Т-8-В-16А	аммиак; диоксид азота; диоксид серы; диоксид углерода; кислород; 2метан; монооксид углерода; сероводород	1	4...20 мА	21500
Анализатор качества горения АКГ-МП-2П	аммиак; диоксид азота; диоксид серы; диоксид углерода; кислород; метан; монооксид углерода; сероводород	2	4...20 мА	11900

**Выбор регулирующего органа.** В качестве регулирующего устройства используется микропроцессорный контроллер. В рамках данной работы рассмотрим 2 контроллера от различных производителей, таких как: «ОВЕН» и «Siemens» [65, 68]. Для реализации задачи необходимо 20 аналоговых входов, 18 дискретных входов, интерфейсные порты, а также 18 дискретных выходов. Также необходимо учитывать цену контроллера. Проведем сравнение характеристик контроллеров этих производителей.

Программируемый логический контроллер фирмы «ОВЕН» ОВЕН ПЛК160 предназначен для создания систем автоматизированного управления технологическим оборудованием в энергетике, на транспорте, в различных

областях промышленности, жилищно-коммунального и сельского хозяйства. Технические характеристики ОВЕН ПЛК160 приведены в таблице 2.10.

Таблица 2.10 – Технические характеристики ОВЕН 160

Технические характеристики	Тип ПЛК: ОВЕН 160
Центральный процессор	32–разрядный RISC процессор 50 МГц на базе ядра ARM7
Напряжение питания, В	90...245
Параметры встроенного вторичного источника питания, В	выходное напряжение $24\pm 3$ , ток не более 180 мА
Потребляемая мощность для переменного тока не более, Вт	18
Количество аналоговых входов	12
Количество дискретных входов	16
Интерфейсы	RS–485, RS–232
Протоколы	ОВЕН, Modbus RTU, Modbus ASCII, GateWay

Рассмотрим контроллеры SIMATIC S7–300 – это универсальные модульные программируемые контроллеры из линейки контроллеров SIMATIC S7 концерна «Siemens AG» для решения задач автоматизации низкого и среднего уровня сложности [68]. Данные контроллеры имеют широкий спектр модулей для максимальной адаптации к требованиям решаемой задачи. Базовая стойка однорядной конфигурации контроллера содержит следующие модули: центральный процессор (CPU), блок питания (PS) и до 32 сигнальных, функциональных или коммутационных модулей (SF/FM/CP). Технические характеристики SIMATIC S7–300 приведены в таблице 2.11.

Таблица 2.11 – Технические характеристики SIMATIC S7–300

Технические характеристики	Тип ПЛК: SIMATIC S7–300
Рабочая память, Кб	128
Время выполнения: логических операций, операций с фиксированной точкой, операций с плавающей точкой, с	0,06 0,16 0,59
Количество флагов/ таймеров/счетчиков, шт.	2048/256/256
Количество каналов вводов – вывода, дискретных/аналоговых, не более, шт.	16384/1024
Языки программирования	STEP 7 (LAD, FBD, STL), S7–SCL, S7– GRAPH
Напряжение питания, В	24

Выбираем SIMATIC S7–300, так как эти контроллеры удобны в использовании и содержатся в базе контроллеров ПО TIA Portal, на котором планируется создавать SCADA систему. Также данные контроллеры имеют мощные вычислительные ресурсы и большой объем памяти, наличие дискретных и аналоговых входов/выходов на борту контроллера, наличие последовательных портов (RS-232, RS-485) на борту контроллера, наличие порта Ethernet для включения в локальные или глобальные сети верхнего уровня.

Кроме того, модульная конструкция контроллера S7-300, работа с естественным охлаждением, возможность применения структур локального и распределенного ввода-вывода, широкие коммуникационные возможности, множество функций, поддерживаемых на уровне операционной системы, высокое удобство эксплуатации и обслуживания обеспечивают возможность получения оптимальных решений для построения систем автоматического управления технологическими процессами в различных областях промышленного производства. Для контроллеров фирмы Siemens S7-300 доступна широкая база данных по чертежам и каталогам для всех модулей и

крепежных элементов данного контроллера, что значительно упрощает работу на этапе конструирования.

**Выбор датчиков положения.** В качестве датчика положения выбираем встроенный в дизельный ДВС фирмы Kirloskar AV-1 датчик положения коленчатого вала двигателя, по которому определяется частота вращения коленчатого вала [7].

**Выбор блока ручного управления.** В качестве устройства ручного управления будем использовать блок ручного управления БРУ–42–03. Блок оснащён устройствами для ручного или переключения дистанционным вариантом с автоматического способа управления на вид ручного режима, и наоборот, имеет управление при помощи кнопок интегрирующими исполнительными механизмами, оснащен световой индикацией режимов любого управления, и выходным сигналом регулирующего устройства, имеющего импульсный выходной сигнал, имеет функцию определения положений регулирующих органов. Входной сигнал стрелочного индикатора блока 4...20 мА. Электрическое питание блока осуществляется напряжением 24 В.

**Выбор исполнительного механизма.** Исполнительный механизм выбираем исходя из вида регулирующего органа и крутящего момента [69]. Выбираем ИМ типа МЭО-16/12,5-0,25-Р-99 [64] с номинальным значением момента на выходном валу 16 Н·м, номинальное значение полного хода 0,25 об., номинальное значение времени полного хода 12,5 с. Данный исполнительный механизм снабжен датчиком положения выходного вала и функцией ручного управления. Питание данного исполнительного механизма осуществляется от сети переменного тока 220 В. Цена составляет 19000 рублей.

Для регулирования расхода воздуха, а также расходов жидкостей выбираем ИМ типа МЭОФ-630/25-0,25-Р-97 [64] с номинальным значением момента на выходном валу 630 Н·м, номинальное значение полного хода 0,25 об., номинальное значение времени полного хода 25 с. Данный

исполнительный механизм снабжен датчиком положения выходного вала и функцией ручного управления. Питание данного исполнительного механизма осуществляется от сети переменного тока 220 В. Цена составляет 56400 рублей.

**Выбор блока управления исполнительным механизмом.** В качестве блока управления исполнительным механизмом будем использовать интеллектуальный блок серии БУЭР1-30-02, выполняющий пуск, реверс и останов однофазных электродвигателей.

Блоки типа БУЭР, выпускаются ЗАО «Волмаг» и являются аналогами известных пускателей типа ПБР. Блоки данного типа позволяют работать в режиме повторно-кратковременного включения. В состав блока входит микропроцессор, два интерфейсных канала RS-485, поддерживающих протокол Modbus, и преобразователь питания. Выберем два блока БУЭР1-30-02.

**Выбор коммутаторов.** В качестве коммутаторов выбираем коммутатору с функцией распределения сигнала D-Link DES-1210-08P. Коммутатор D-Link DES-1210-08P с плоским темно-серым корпусом оборудован 8 портами 10/100Base-TX для присоединения устройств посредством кабеля типа "витая пара". Каждый порт сетевого устройства обладает поддержкой PoE и может питать по кабелю оборудование - IP-телефоны, беспроводные точки доступа и IP-камеры. Большой общий бюджет PoE, распределяемый между всеми портами, позволяет обеспечить стабильное питание сетевой периферии.

**Выбор панели визуализации.** В качестве панели визуализации выбираем панельный компьютер SIMATIC Panel PC, функционал которого целиком заключён в едином корпусе (чаще всего в корпусе монитора). Панельные компьютеры промышленного исполнения отличаются: повышенной надёжностью; повышенным уровнем влагозащиты передних панелей (класс IP65); применением жёстких дисков SSD, стойких к вибрациям

и ударам; наличием специализированных интерфейсных портов (RS232/422/485, USB).

Panel PC состоит из системного блока и блока оперативного управления. На фронтальной панели блоков оперативного управления расположен порт USB 2.0 для подключения внешней периферийной аппаратуры (мышь, клавиатура и т.д.). На тыльной стороне корпуса блока оперативного управления расположены разъемы для подключения к системному блоку. Подключение выполняется соответствующими соединительными кабелями.

**Выбор технических средств для автоматизированного рабочего места.** АРМ объединяет программно-аппаратные средства, обеспечивающие взаимодействие человека с компьютером, предоставляет возможность ввода информации. Организация сетей передачи данных осуществляется посредством сетей Ethernet/Modbus TCP/IP, полевой шины Modbus и технологической сети Ethernet.

В таблице 2.12 приведены два компьютера, между которыми производится выбор.

Таблица 2.12 – Технологические характеристики компьютеров

	Обозначение компьютера	
Наименование	Asus KP55	Acer Aspire TC-605 DT.SRQER.085
Графический контроллер	GeForce GT720	GeForce GT625
Операционная система	Windows 10 SL 64 Bit	Windows 8.1 SL 64 bit
Оперативная память (ram)	8 ГБ	8 ГБ
Тип процессора	Core i7-4660	Core i5-4460
Кэш-память	8 МБ	6 МБ
Стоимость	26500	27000

Выбираем компьютер Asus. Так как компьютер имеет лучшие характеристики, такие как оперативная память, тип процессора, кэш-память, и наименьшую стоимость.

**Выбор щита серверного.** В качестве щита серверного выбираем Сервер Lenovo ThinkStation P330 Tower Gen2. Все характеристики удовлетворяют опросным листам. Рабочая станция ThinkStation P330 сочетает в себе производительность и скорость, необходимые для выполнения разнообразных задач. Процессоры Intel в сочетании с поддержкой накопителей M.2 увеличивают скорость работы и снижают время отклика. При разработке ThinkStation P330 особое внимание уделялось защите: устройство поддерживает аппаратное шифрование данных в модуле TPM и оснащено физическим замком, ограничивающего доступ ко внутренним компонентам.

**Выбор KVM-переключателя.** Для коммутации одного комплекта устройств ввода-вывода между несколькими компьютерами выбираем KVM-переключатель ATEN CS-1308. Данное оборудование поддерживает подключение до восьми компьютеров сразу. Это устройство может устанавливаться на стойку 19 дюймов. В коробке производитель прикладывает монтажный комплект, который потребуется при размещении оборудования. Необходимые KVM-кабели тоже входят в набор поставки. Питание – от внешнего блока, подключаемого к розетке. Энергопотребление у устройства невысокое – 5 Вт, оно расходует минимум энергии. Корпус изготовлен из металлического сплава и защищает основные комплектующие.

**Выбор принтера.** В качестве принтера выбираем принтер Kyocera ECOSYS M8130cidn. Данный принтер удовлетворяет всем требованиям опросного листа. Аналогов данному принтеру нет. Устройство способно печатать до 30/15 страниц форматов A4/A3 в минуту. Высокопроизводительная профессиональная печать, копирование, цветное сканирование и факс. Имеет простой в использовании цветной сенсорный дисплей панели управления с интуитивно понятной навигацией. Для экономии электроэнергии предусмотрен низкий уровень энергопотребления.



После выбора технических средств автоматизации была составлена заказная спецификация. Заказная спецификация представлена на листах с шифром ФЮРА.421000.002 ЗС.

## 2.7 Составление перечня входных и выходных сигналов

На основе функциональной схемы составлен перечень входных и выходных сигналов, который представлен в таблице 2.13. Для работы системы используются 20 входных аналоговых сигналов (AI), 18 входных дискретных сигнала (DI) и 18 дискретных выходных сигналов (DO).

Таблица 2.13 – Перечень входных/выходных сигналов

Наименование параметра (единица измерения)	Позиция	AI	AO	DI	DO
Температура в камере сгорания	1	+			
Температура в камере сгорания	1	+			
Температура в камере сгорания	1	+			
Температура в системе охлаждения	2	+			
Температура в системе охлаждения	2	+			
Температура смазочного масла	2	+			
Температура выхлопных газов	2	+			
Температура атмосферного воздуха	2	+			
Давление в камере сгорания	3	+			
Давление в камере сгорания	3	+			
Расход дизельного топлива	4	+			
Расход воздуха	4	+			
Расход воды	4	+			
Расход топливной эмульсии	4	+			
Клапан дизельного топлива открыт	5-6			+	
Клапан дизельного топлива закрыт	5-6			+	
Клапан дизельного топлива открыть	5-6				+
Клапан дизельного топлива закрыть	5-6				+
Клапан воздуха открыт	5-6			+	
Клапан воздуха закрыт	5-6			+	
Клапан воздуха открыть	5-6				+
Клапан воздуха закрыть	5-6				+
Клапан воды открыт	5-6			+	
Клапан воды закрыт	5-6			+	
Клапан воды открыть	5-6				+
Клапан воды закрыть	5-6				+
Клапан топливной эмульсии открыт	5-6			+	
Клапан топливной эмульсии закрыт	5-6			+	
Клапан топливной эмульсии открыть	5-6				+

Наименование параметра (единица измерения)	Позиция	AI	AO	DI	DO
Клапан топливной эмульсии закрыть	5-6				+
Уровень дизельного топлива	7	+			
Уровень воды	7	+			
Уровень топливной эмульсии	7	+			
Концентрация выхлопных газов	8	+			
Концентрация загазованности	8	+			
Положение вала	9	+			
Камера смещения включена	10			+	
Камера смещения выключена	10			+	
Камера смещения включить	10				+
Камера смещения выключить	10				+
Топливный насос включен	10			+	
Топливный насос выключен	10			+	
Топливный насос включить	10				+
Топливный насос выключить	10				+
Вытяжной вентилятор включен	10			+	
Вытяжной вентилятор выключен	10			+	
Вытяжной вентилятор включить	10				+
Вытяжной вентилятор выключить	10				+
Пожарные извещатели включены	11			+	
Пожарные извещатели выключены	11			+	
Пожарные извещатели включить	11				+
Пожарные извещатели выключить	11				+
Ручные извещатели включены	12			+	
Ручные извещатели выключены	12			+	
Ручные извещатели включить	12				+
Ручные извещатели выключить	12				+

## 2.8 Проектирование схемы внешних проводок

Монтажная документация предназначена для выполнения монтажных работ. Эту документацию также используют в процессе эксплуатации, наладке, ремонте и выполнения профилактических работ. Для сложных систем автоматизации отдельно выполняют монтажные схемы щитов, пультов, внешних электрических и трубных проводок. Монтажные схемы внешних электрических проводок приведены на листе с шифром ФЮРА.421000.002 С4.

Монтажная документация, разрабатываемая в процессе проектирования систем автоматического регулирования, включает в себя:

- 1) монтажную документацию щитов и пультов;

2) монтажную документацию внешних электрических и трубных проводок.

Монтажные схемы, показывают каким образом соединены между собой клеммы или выводы технических средств, расположенных:

- 1) на конструкции;
- 2) за пределами конструкций.

Для разработки монтажной документации используются следующие материалы:

- 1) функциональная схема;
- 2) принципиальная электрическая схема;
- 3) техническая документация заводов изготовителей средств автоматизации и других средств;
- 4) общие виды щитовых и других конструкций.

В данной работе необходимо разработать монтажную схему для лабораторного стенда дизельного ДВС, предназначенного для сжигания топливных эмульсий в условиях вторичного измельчения, для этого нужно выполнить следующие этапы: нанести на монтажную схему технические средства автоматизации, в соответствии с принятыми обозначениями; выбрать проводки для соединения технических средств; произвести нумерацию проводников; выполнить подключения средств измерения и управления в шкаф автоматизации.

На схеме вверху поля чертежа размещена таблица с поясняющими надписями. Под таблицей с поясняющими надписями расположены изображения первичных преобразователей и других средств автоматизации, устанавливаемых непосредственно на технологическом оборудовании и технологических трубопроводах.

Первичные преобразователи, внешние приборы и шкаф управления соединены между собой электрическими линиями связи, выполненными с помощью электрических кабелей, проводов и жгутов проводов.

К внешним электрическим и трубным проводкам относят такие проводки, которые расположены за пределами щитов и пультов.

Целью проектирования внешних и внутренних электрических и трубных проводок является создание монтажной документации, необходимой и достаточной для прокладки трубных и электропроводок, коммутации токоведущих жил и труб к техническим средствам автоматизации и вспомогательным элементам, проверки проводок и ввода их в эксплуатацию.

## 2.9 Разработка принципиальной электрической схемы щита управления

Электрическая схема является основным чертежом, отражающим состав аппаратов и устройств системы управления. Также при помощи принципиальной электрической схемы разрабатываются монтажные чертежи, которые используются для пусконаладочных работ [58]. При проектировании схемы используются полные изображения средств, обеспечивающих работоспособность системы управления.

Схема соединений показывает все устройства и элементы, входящие в состав изделия. На схеме изображаются все устройства и элементы, входящие в схему, а также соединения между ними. Устройства изображаются в виде прямоугольников, элементы – в виде условных графических изображений, установленных в ЕСКД [60]. Около условных графических обозначений устройств и элементов указывают позиционные обозначения, присвоенные им на принципиальной схеме. На схеме необходимо указывать обозначения выводов(контактов) элементов, нанесенные на изделие или установленные в документации изделия. Проводам, жгутам, кабелям на схеме присваиваются порядковые номера. Нумерация проводится в пределах изделия отдельно для кабелей и проводов. Допускается сквозная нумерация в пределах изделия.

Для разработки схемы необходимо выполнить ряд действий:

- 1) нанести на схему технические средства автоматизации с соответствующими стандартами;

2) произвести соединение проводок с клеммами устройств по требованиям завода изготовителя оборудования;

3) произвести нумерацию проводников.

При выполнении схемы используем развернутые изображения элементов технических средств. Расположение графического текстового материала выбрано для облегчения чтения этого чертежа. Электрическая схема соединений выполнена с применением условных графических изображений.

Линии связи состоят только из горизонтальных и вертикальных отрезков и имеют минимальное число взаимных пересечений. Расстояние между соседними параллельными линиями не менее 5 мм.

В данном разделе была разработана схема принципиальная электрическая щита управления лабораторным стендом дизельного ДВС, которая приведена на листе с шифром ФЮРА.421000.002 Э4.

Электропитание всех технических средств осуществляется от распределительного щита питания переменным напряжением 220 В, 50 Гц. Питание устройств внутри щита осуществляется с помощью блока питания 24 В. Предусмотрены резервные клеммы 24 и 220 В.

На входе цепи питания 220 В предусмотрена защита от перенапряжения РТ 2-РЕ/S-230АС (Z01). Для резервирования питания и преобразования напряжения сети переменного тока 220 В в постоянное напряжение 24 В используется импульсный источник питания типа EF UPS 1AC/24DC-16 (G1) с блоком аккумуляторной батареи АБ-24М (G2), который обеспечивает автономную работу всех устройств, входящих в состав ШУ. Также данные блоки питания G1 и G2 поддерживают неизменным напряжение при некотором значении перезагрузки, выпрямляют его и отсекают его при коротком замыкании на выходе. В шкафу предусмотрено внутреннее рабочее освещение (лампа EL1) для обслуживания и ремонта. Концевой выключатель SQ1 предназначен для автоматического включения лампы при открытии и выключения при закрытии дверцы ШУ. Для удобства обслуживания

оборудования в шкафу управления предусмотрена розетка (XS1). Температура воздуха внутри шкафа контролируется термореле типа KTS 1141 (KK1, KK2), уставки которых равны 5 и 50 °С. В шкафу также установлен вентилятор M1, который включается при срабатывании термореле и отводит тепло от ТСА.

На схеме принципиальной электрической представлена таблица расположения модулей на панели контроллера S7-300. При разработке принципиальной электрической схемы использованы 12 модулей контроллера S7-300 (1 источник питания PS 307, 1 центральный процессор CPU 313C, 1 интерфейсный модуль IM 361, 3 модуля ввода аналоговых сигналов SM 331, 4 модуль ввода дискретных сигналов SM 321, 2 модуля вывода дискретных сигналов SM 322).

Для ввода интерфейсных сигналов по RS-485 предусмотрена защита РТ 4х1-12АС-ST, которая представляет защитный штекер РТ со схемой защиты 4-проводной сигнальной цепи, с односторонним заземлением и номинальным напряжением 12 В.

Для ввода аналоговых сигналов в щите предусмотрены разделительные преобразователи ET-491, которые обеспечивают гальваническую развязку цепей контроллера и полевых цепей, сигнал с которых поступает на соответствующие блоки контроллера. Для ввода дискретных сигналов служат устройства защиты дискретных каналов ввода/вывода от помех БС-118-12/24. Для выдачи управляющих сигналов используются релейные выходы, а также реле.

Дополнительно к принципиальной электрической схеме разработана схема расположения блоков зажимов в щите. Схема представлена на листе с шифром ФЮРА.421000.002 Э7. Схема расположения Э7 – схема, определяющая относительное расположение блоков зажимов в щите [60].

## 2.10 Составление перечня элементов щита управления

Для однозначной записи в сокращенной форме сведений об элементах и устройствах применяются условно буквенные обозначения согласно ЕСКД ГОСТ 2.710-81 [60]. Прописные буквы, а также цифры латинского алфавита присвоены элементам схемы согласно их назначению. На основании принятых обозначений составлен перечень элементов. Перечень элементов представлен на листе с шифром ФЮРА.421000.002 ПЭ.

Перечень элементов помещают на первом листе схемы или выполняют в виде самостоятельного документа [60]. Перечень элементов оформляют в виде таблицы по ГОСТ 2.701. Если перечень элементов помещают на первом листе схемы, то его располагают, как правило, над основной надписью. Для электронных документов перечень элементов оформляют отдельным документом.

Элементы в перечень записывают группами в алфавитном порядке буквенных позиционных обозначений. В пределах каждой группы, имеющей одинаковые буквенные позиционные обозначения, элементы располагают по возрастанию порядковых номеров. Для облегчения внесения изменений допускается оставлять несколько незаполненных строк между отдельными группами элементов, а при большом количестве элементов внутри групп — и между элементами [60].

## 2.11 Разработка сборочного чертежа щита управления

Щиты систем автоматизации предназначены для размещения в них средств контроля и управления технологическими процессами, контрольно-измерительных приборов, сигнальных устройств, аппаратуры управления, автоматического регулирования, защиты, блокировки, линий связи между ними (трубная и электрическая коммутация) и т.п. Щиты устанавливаются в

производственных и специальных щитовых помещениях: операторских, диспетчерских, аппаратных и т.п.

Целью данного этапа является составление комплекта чертежей, необходимых для изготовления щита, монтажа технических средств автоматизации.

Учитывая конструктивные особенности, в том числе степень защиты от прикосновения к токоведущим частям, в операторском помещении применим для монтажа средств автоматизации разрабатываемой системы регулирования шкаф Rittal ES 5884.500 производства компании Rittal [70].

В данном случае для размещения средств автоматизации используем щит высотой 1700 мм, шириной 700 мм и глубиной 10 мм. Фасадная сторона щитов (шкафных и панельных с каркасом) разбита на два функциональных поля. Разбивка выполнена на основе рационального распределения приборов, органов управления и сигнальной арматуры. Высота шкафа позволяет без труда получить доступ ко всем узлам.

Блоки контроллера монтируются в верхней части щита управления. Все остальные блоки, входящие в состав системы предназначены для монтажа на DIN-рейку. В нижней части панели щита расположены сборники клеммных колодок.

Сборочный чертеж щита управления содержит вид спереди, сзади, сбоку, вид на внешнюю панель и т.д. В масштабе распределены средства автоматизации, показаны основные габаритные и справочные размеры. Сборочный чертеж щита управления представлен на листе с шифром ФЮРА.421000.002 СБ.

Также выполнен чертеж общего вида. Чертежом общего вида в технике принято называть документ, имеющий графическое представление, который определяет конструкцию того или иного узла или агрегата. Из него становится ясно, каким образом взаимодействуют его основные компоненты, каков общий принцип функционирования устройства. Чертеж общего вида



одиночного щита содержит вид спереди, вид на внутренние плоскости, перечень составных частей.

С точки зрения оформления, чертежи общего вида практически не отличаются от чертежей сборочных, однако они имеют совершенно другое назначение. Основное отличие чертежей общего вида от сборочных заключается в их предназначении. Чертеж общего вида входит в объем эксплуатационной документации, хранится в щите. Используется при проведении ремонтных работ, замене вышедших из строя ТСА. Позволяет при проведении работ большого объема сохранить расположение элементов в соответствии с исходным конструктивом щита.

Общий вид щита представлен на листе с шифром ФЮРА.421000.002 ВО.

## 2.12 Составление спецификации щита управления

Щит управления (шкаф управления) обеспечивает контроль за распределением питания, а также управление питанием технологического оборудования. Щиты управления предназначены для управления работой электродвигателей, насосов, вентиляторов, заслонок и другого электрооборудования. Управление щитом осуществляется в местном, автоматическом и дистанционном режимах. Составление спецификации щита управления является важным моментом при проектировании автоматизированной системы. Спецификацию щита выполняют по ГОСТ 21.101 [71]. При этом графу «Масса» допускается не заполнять. Спецификация составного щита содержит два раздела: сборочные единицы; стандартные изделия. Единичные щиты, имеющие чертежи общих видов, включают в раздел «Сборочные единицы».

Вспомогательные элементы, не имеющие чертежа общего вида, включают в раздел «Стандартные изделия». Спецификация единичного щита, как правило, состоит из разделов: документация; детали; стандартные изделия; прочие изделия; материалы. В раздел «Документация» включают

таблицы соединений и подключения. В раздел «Детали» включают нетиповые детали для установки приборов и аппаратуры внутри щитов (угольники, рейки), элементы (символы оборудования и коммуникаций) мнемосхем.

В раздел «Стандартные изделия» включают: щитовые конструкции; другие стандартные изделия.

В раздел «Прочие изделия» включают все приборы и аппаратуру, монтажные изделия по группам в следующей последовательности: приборы; электроаппараты; трубопроводная арматура; изделия для электромонтажа; изделия для монтажа трубных проводок; изделия для нанесения надписей.

В раздел «Материалы» включают электрические провода, указанные в таблице соединений, и трубы.

## 2.13 Разработка фрагментов информационного, математического и программного обеспечений

В данном разделе разработаны алгоритмы управления дизельным ДВС при пуске и стационарном режиме работы в виде блок-схем (рисунок 2.5 и рисунок 2.6). По определению алгоритм управления – это отработанный порядок принятия решений по управлению, планированию и передачи информации в процессе управления.

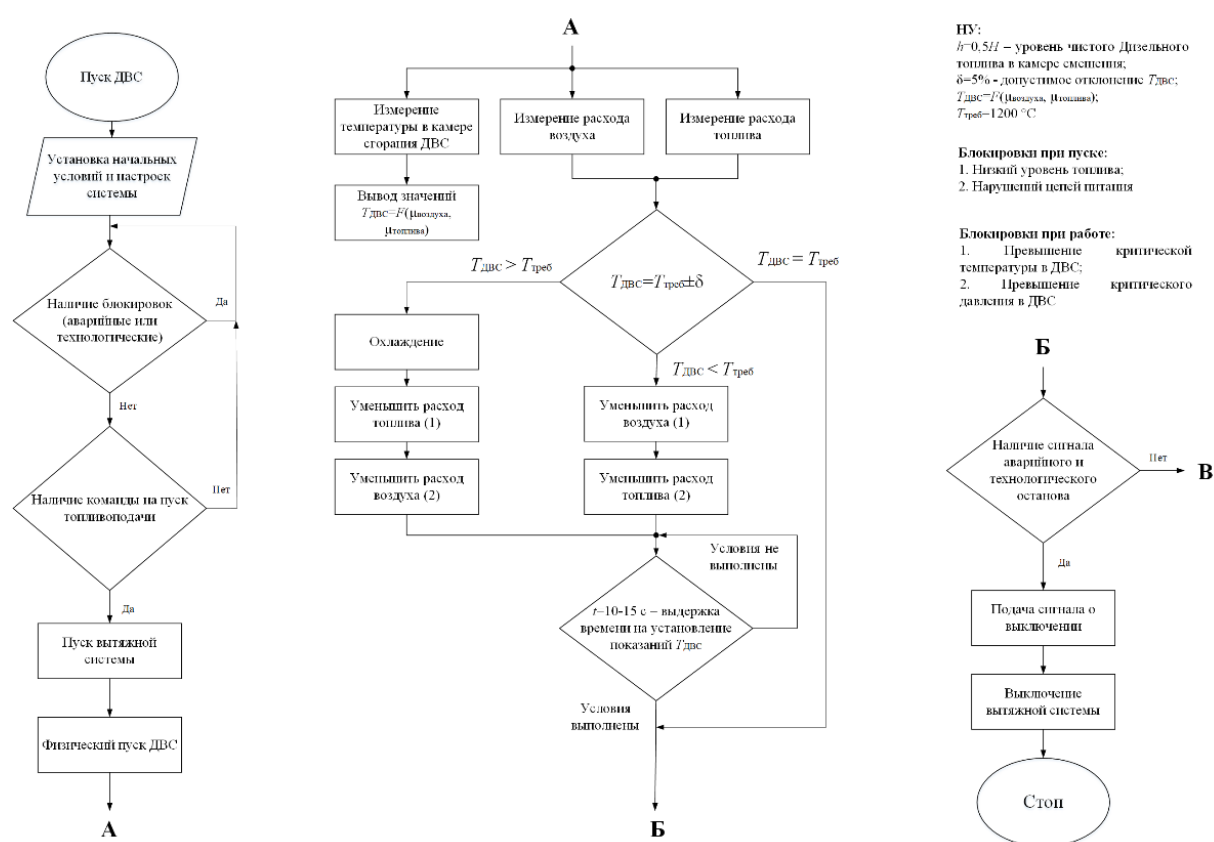


Рисунок 2.5 – Блок-схема управления лабораторным стендом дизельного ДВС при пуске

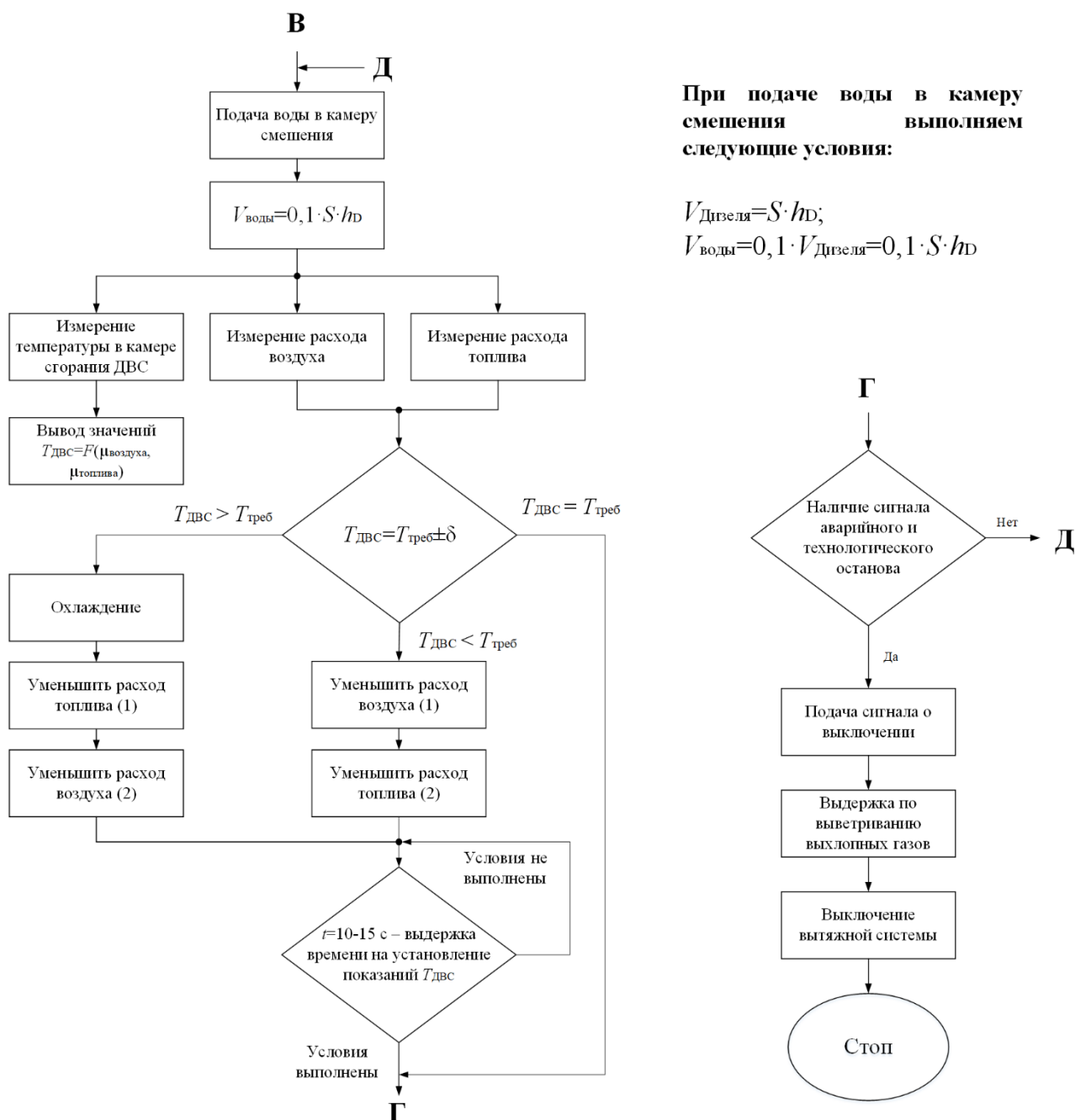


Рисунок 2.6 – Блок-схема управления лабораторным стендом дизельного ДВС при стационарном (нормальном) режиме работы

## 2.14 Разработка мнемосхем SCADA-системы

В данном разделе разработана мнемосхема SCADA-системы для управления лабораторным стендом дизельного ДВС (рисунок 2.7). Мнемосхема – совокупность сигнальных устройств и сигнальных изображений оборудования и внутренних связей контролируемого объекта, размещаемых

на диспетчерских пультах, операторских панелях или выполненных на персональном компьютере. Информация, которая выводится на мнемосхему, может быть представлена в виде аналогового, дискретного и релейного сигнала, а также графически. Наглядно отображая структуру системы, мнемосхема облегчает оператору запоминание схем объектов, взаимосвязь между параметрами, назначение приборов и органов управления. В процессе управления мнемосхема является для оператора важнейшим источником информации о текущем состоянии системы, характере и структуре протекающих в ней процессов, в том числе связанных с нарушением технологических режимов, авариями и т.п.

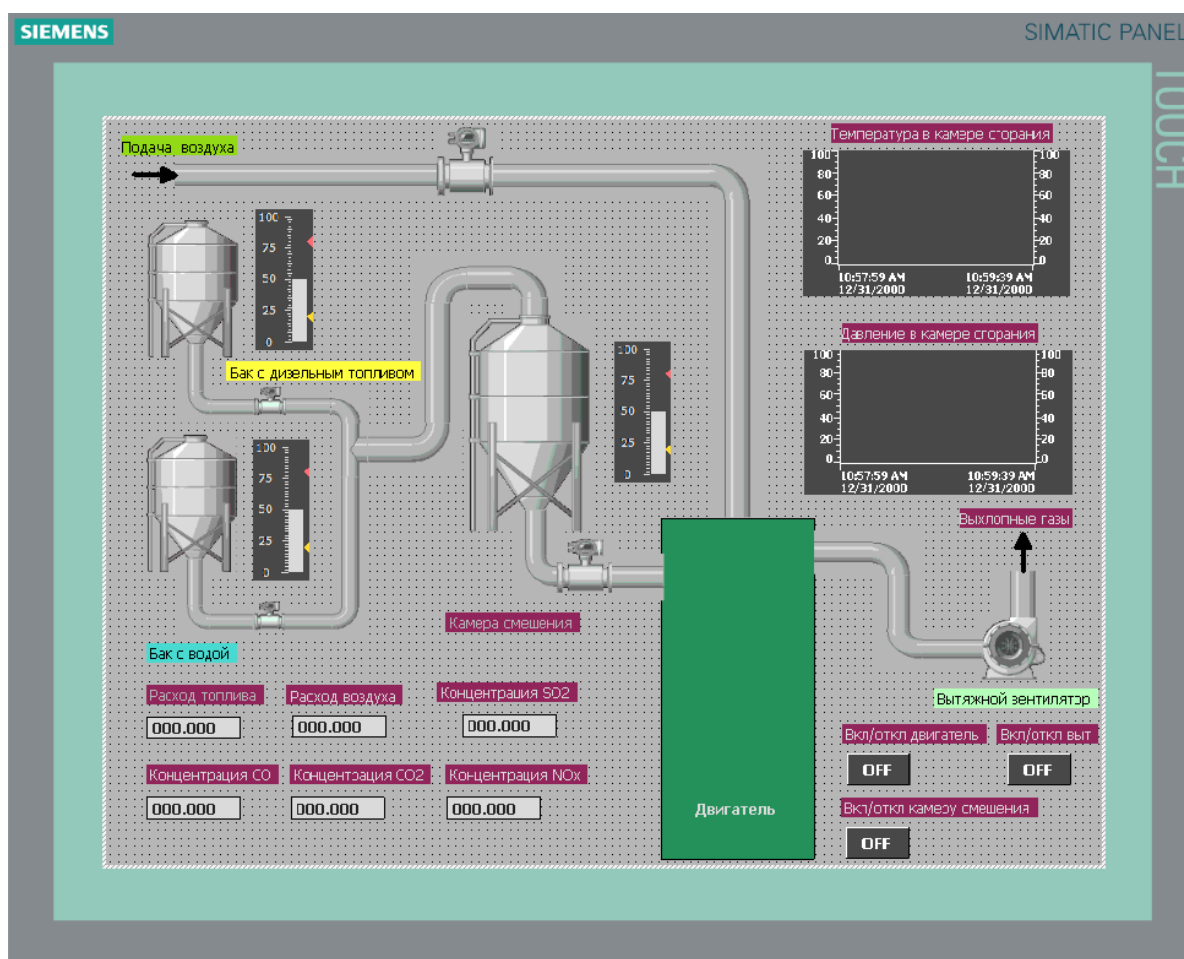


Рисунок 2.7 – Мнемосхема SCADA-системы для управления лабораторным стендом дизельного ДВС

Требования, предъявляемые к мнемосхеме, устанавливает предприятие, для которого она предназначена. В данной работе схема разрабатывалась в соответствии с общими требованиями: 1) мнемосхема должна состоять из элементов, которые необходимы для управления и контроля объекта; 2) отдельные элементы или группы элементов, наиболее существенные для контроля и управления, должны выделяться размерами, формой, цветом; 3) элементы мнемосхемы должны быть понятными и интуитивными, хорошо видимыми. Исходя из этих принципов была разработана мнемосхема процесса управления лабораторным стендом дизельного ДВС. Разработанная мнемосхема приведена на рисунке 8. В центральной части мнемосхема содержит условное изображение технологического процесса с указанием ключевых параметров.

## 2.15 Выводы по разделу Проектирование АСУ подготовки и сжигания топлива в двигательной установке с микро-взрывной фрагментацией капель топлив

В данной работе разработана автоматизированная система управления лабораторным стендом дизельного ДВС, предназначенного для сжигания топливных эмульсий в условиях вторичного измельчения. Решена задача автоматизированного управления лабораторным стендом дизельного ДВС, которая сводится в основном к необходимости поддержания материального и энергетического балансов в условиях стационарных и переходных режимов.

В ходе выполнения данной работы разработана проектная, схемотехническая и конструкторская документации: схема структурная, схема функциональная, схема принципиальная электрическая, схема монтажная, сборочный чертеж и общий вид щита.

Пояснительная записка к проекту содержит подробное описание основного оборудования, приборов и технических средств автоматизации, а

также мнемосхема и алгоритмы управления. При выборе приборов руководствовались каталогами и сайтами производителей.

При выполнении работы решены основные поставленные задачи:

- произведен системный анализ объекта автоматизации;
- выбрана структура автоматизированной системы регулирования;
- разработана функциональная схема АСУ;
- составлены опросные листы на приборы и средства автоматизации;
- выбраны технические средства АСУ;
- составлен перечень входных и выходных сигналов;
- разработана принципиальная электрическая схема щита управления;
- составлен перечень элементов щита управления;
- спроектирована схема внешних проводок;
- разработан сборочный чертеж щита управления;
- составлена спецификация щита управления;
- разработаны алгоритмы управления и мнемосхемы SCADA-системы.

### 3 РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ НАСТРОЙКИ РЕГУЛЯТОРА

Принцип действия всякой системы автоматического регулирования заключается в обнаружении отклонения регулируемых величин, характеризующих работу объекта или протекание процесса от требуемого режима и при этом воздействовать на объект или процесс так, чтобы устранять эти отклонения.

В настоящее время системы регулирования получили широкое применение в различных отраслях промышленности. В связи с этим проблема определения оптимальных параметров настройки регуляторов систем остаётся актуальной, даже несмотря на то, что разработано большое количество приёмов и методов, позволяющих решать эти проблемы [72]. В частности, существует два инженерных метода расчёта систем регулирования: корневой (с использованием РАФЧХ) и частотный по максимуму АЧХ замкнутой системы (метод В.Я.Ротача) [3, 73].

Цель данного раздела является расчет оптимальных параметров настройки (ОПН) ПИ-регулятора.

Для этого необходимо решить следующие задачи:

- расчет оптимальных параметров настройки (ОПН) ПИ-регулятора;
- обоснование и выбор ОПН регулятора;
- расчет и построение переходного процесса в АСР, оценка его качества.

#### 3.1 Идентификация объекта управления

Идентификация предназначена для получения математических моделей объекта управления. Существует активная и пассивная, в инженерной практике применяют активную идентификацию (на объект подается специализированное входное воздействие и по реакции объекта при обработке результатов получают математическую модель).



В данной работе для получения кривой разгона была использована динамическая модель изменения температуры в камере сгорания дизельного двигателя. Модель составлена на базе экспериментальных исследований, проведенных на реальном объекте. Кривая разгона приведена на рисунке 3.1.

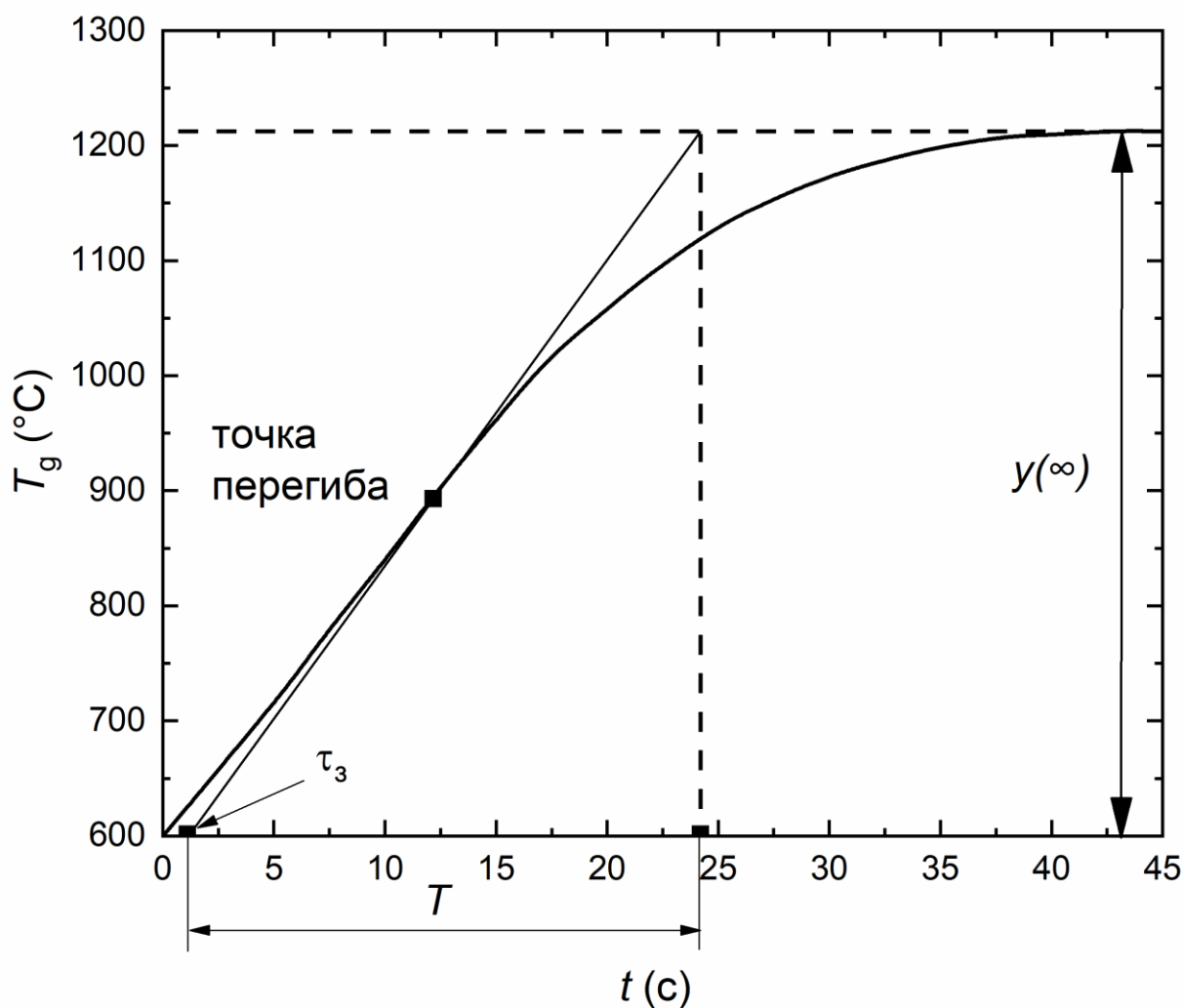


Рисунок 3.1 – Кривая разгона объекта управления

По полученной переходной характеристике определяем динамические параметры объекта, такие как: постоянная времени; запаздывание, коэффициент передачи. Аппроксимирующая передаточная функция в этом случае имеет вид:

$$W(P) = \frac{K \cdot e^{-\tau_3 P}}{T \cdot P + 1}.$$

Последовательность определения параметров передаточной функции следующий:

1. Находим по временной характеристике значения постоянной времени и запаздывание. Показано на рисунке 3.1.

2. Время чистого запаздывания:

$$\tau_3 = 1,1 \text{ с.}$$

3. Определяем постоянную времени  $T$ :

$$T = 22,9 \text{ с.}$$

4. Вычисляем передаточный коэффициент:

$$K = y(\infty) / X_{\text{вх}} = 1220/1250 = 0,976.$$

5. Передаточная функция обогреваемого участка имеет вид:

$$W(P) = \frac{0,976 \cdot e^{-1,1P}}{22,9 \cdot P + 1}.$$

### 3.2 Расчет оптимальных параметров настройки (ОПН) ПИ-регулятора

#### 3.2.1 Обоснование и выбор ОПН регулятора

В качестве закона регулирования выбран ПИ-закон. Данный закон регулирования обладает рядом преимуществ: нулевая статическая ошибка регулирования; простая настройка (настраивается коэффициент усиления и постоянная времени интегрирования); малая чувствительность к шумам в канале измерения (в отличие от ПИД-регулятора).

В качестве схемы автоматического регулирования выбрана одноконтурная система, так как она является более простой, содержит меньшее количество элементов, а, следовательно, является более надежной.

Расчет оптимальных параметров настройки ОПН регуляторов произведен в программном комплексе Matlab Simulink. На рисунке 3.2 представлена структурная схема одноконтурной АСР в программном комплексе Matlab Simulink.

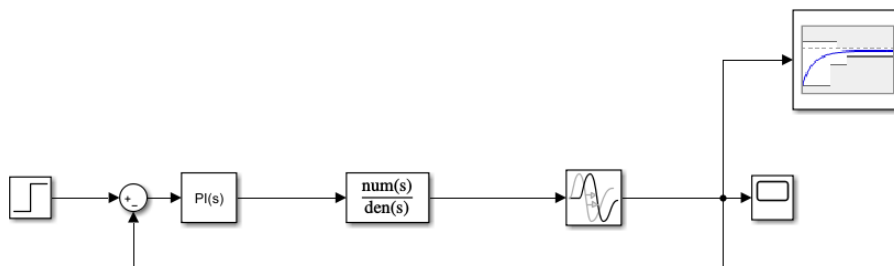


Рисунок 3.2 – Структурная схема одноконтурной АСР в программном комплексе Matlab Simulink

Основными элементами данной структурной схемы являются: Block Parameters: Step; Sum; Block Parameters: PID Controller; Block Parameters: Transfer Fcn; Block Parameters: Transport Delay; Scope; Check Step Response Characteristics; LTI System.

В Simulink встроено средство Simulink Design Optimization, которое позволяет решать задачи синтеза регуляторов для линейных и нелинейных систем на основе задачи оптимизации параметров регулятора. Благодаря использованию эффективных методов оптимизации, возможен синтез регуляторов не только для линейных систем, но и для нелинейных с присутствием неаналитических нелинейностей с памятью.

Рассмотрим использование возможностей пакета Simulink Design Optimization для поиска параметров ПИ-регулятора, удовлетворяющих критериям качества управления во временной области.

Для синтеза регулятора с помощью графического интерфейса Simulink Design Optimization выполним следующее:

- зададим входной сигнал в виде единичного ступенчатого воздействия;
- зададим требования сигналу на выходе объекта управления;
- запустим процесс оптимизации выбранных параметров регулятора.

Модель содержит блок Controller, который является ПИ-регулятором. На рисунке 3.3 представлены параметры блока Controller.

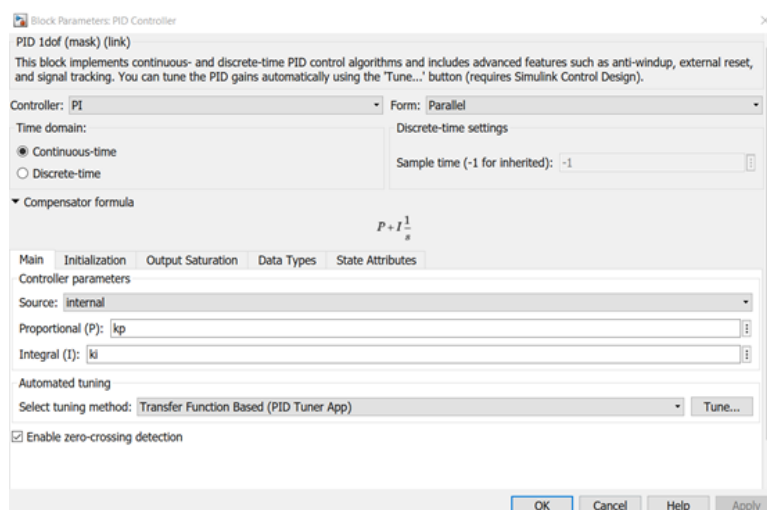


Рисунок 3.3 – Параметры блока Controller

Далее мы используем единичное входное воздействие и оптимизируем параметры модели для удовлетворения спецификаций выходной реакции системы на ступенчатое воздействие.

### 3.2.2 Расчет и построение переходного процесса, оценка его качества

Перетащим блок Signal Constraint в окно модели Simulink. Подключим блок Signal Constraint к выходу объекта управления, как показано на рисунке 3.2.

Далее специфицируем требования к выходному сигналу системы во временной области: время нарастания, время установления и величина перерегулирования. Чтобы ввести требования к качеству управления, дважды щелкнем на блок Signal Constraint block, открыв параметры блока - окно Block Parameters: Signal Constraint (рисунок 3.4).

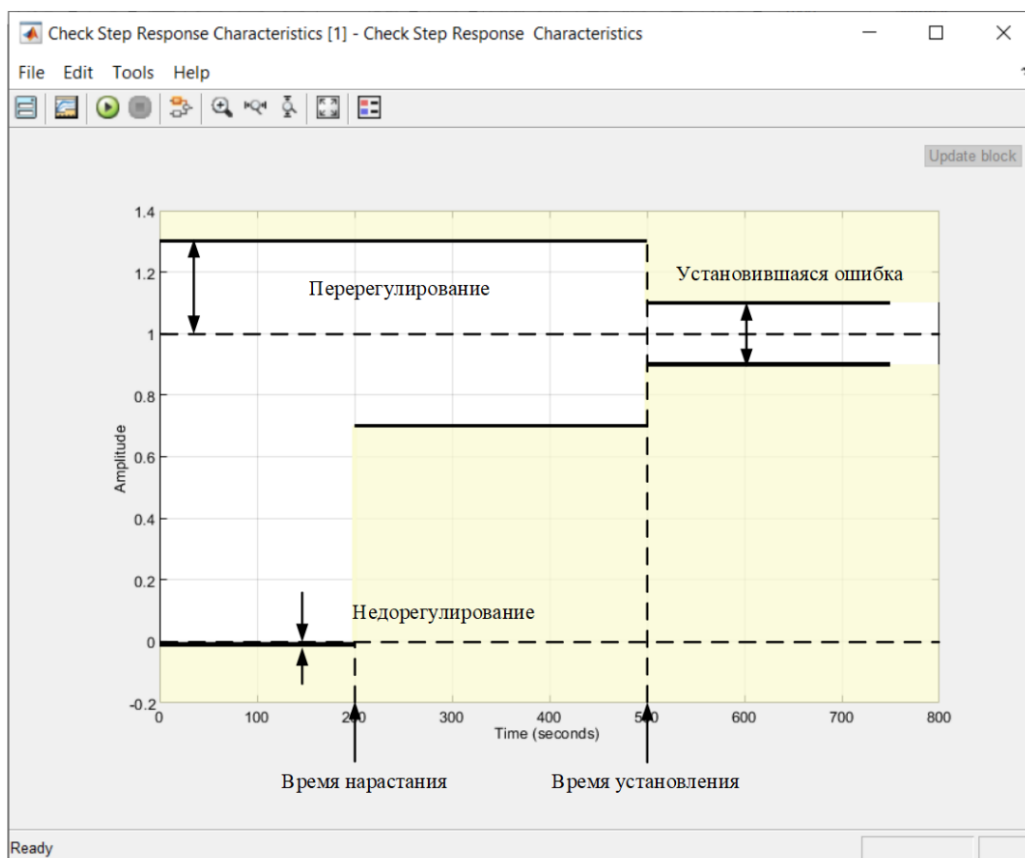


Рисунок 3.4 – Параметры блока Signal Constraint

При оптимизации параметров модели, программное обеспечение изменяет значения параметров модели для удовлетворения указанных требований качества регулирования. Чтобы задать параметры для оптимизации необходимо открыть Open Response Optimization Tool. В окне Open Response Optimization Tool выберем переменные для настройки регулятора  $k_p$  и  $k_i$  (Design Variables Set). Это действие показано на рисунке 3.5.

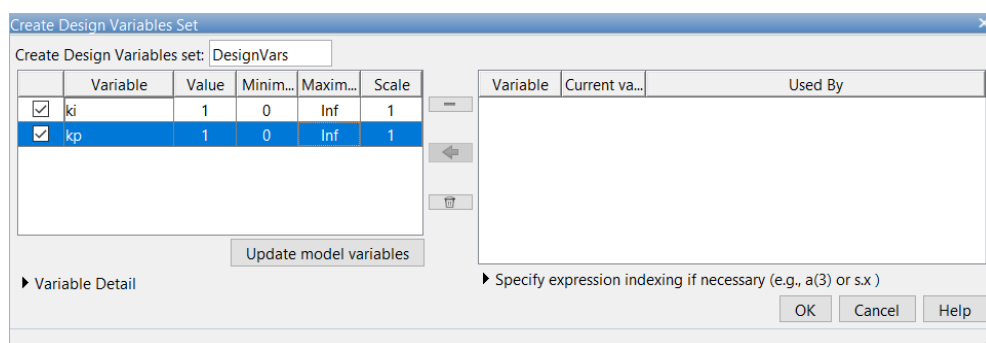


Рисунок 3.5 – Диалоговое окно настраиваемых параметров

Minimum и Maximum - границы изменения параметров Value - коэффициент масштабирования для параметра. Чтобы ограничить область изменения параметра только положительными значениями, необходимо ввести в поле Minimum каждого параметра значение 0, как показано на рисунке 3.5.

Далее запускаем процесс оптимизации параметров модели (рисунок 3.6). В окне параметров блока Signal Constraint, в меню необходимо выбрать Optimization / Start для запуска оптимизации.

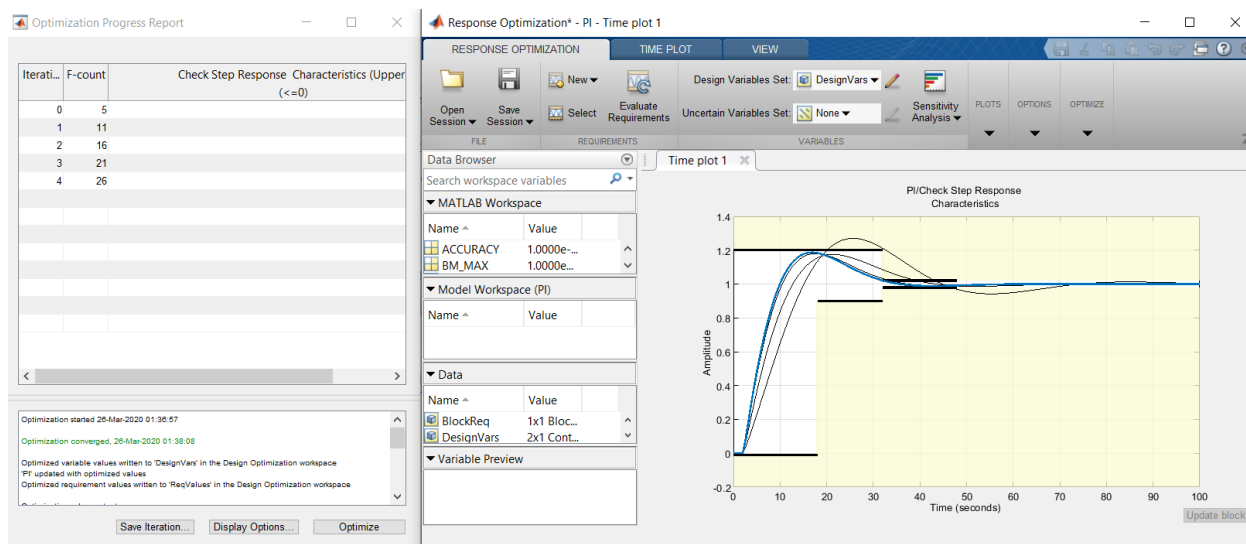


Рисунок 3.6 – Окно прогресса оптимизации

Во время каждой итерации оптимизации, программа моделирует систему, и метод оптимизации (по умолчанию градиентный спуск, но можно выбирать и другие) изменяет параметры регулятора с целью уменьшить расстояние между полученной в результате моделирования реакцией системы на выходе и кусочно-линейными спецификациями допустимых границ выходного сигнала.

Сообщение Optimization converged указывает, что методом оптимизации найдено решение, которое отвечает требованиям к границам выходного сигнала как указано в свойствах блока Signal Constraint. Оптимизированные значения параметров отображаются в окне MATLAB Workspace (рисунок 3.7)

и присвоены соответствующим переменным  $k_i$ ,  $k_p$  – могут использоваться как параметры модели Simulink.

	$k_i$	0.5129
	$k_p$	3.7777

Рисунок 3.7 – Оптимизированные значения для ПИ-регулятора

В окне параметров блока Signal Constraint, также показаны реакции модели на входной сигнал в течение процесса оптимизации, чтобы позволяет проверить, соответствует ли конечная реакция (она обозначается черным цветом) требованиям качества управления. Выводится также график первоначальной реакции системы в синем цвете (рисунок 3.6).

Далее с использованием оптимизированных значений коэффициентов  $k_p$  и  $k_i$  переходим к построению переходного процесса в АСР (рисунок 3.8).

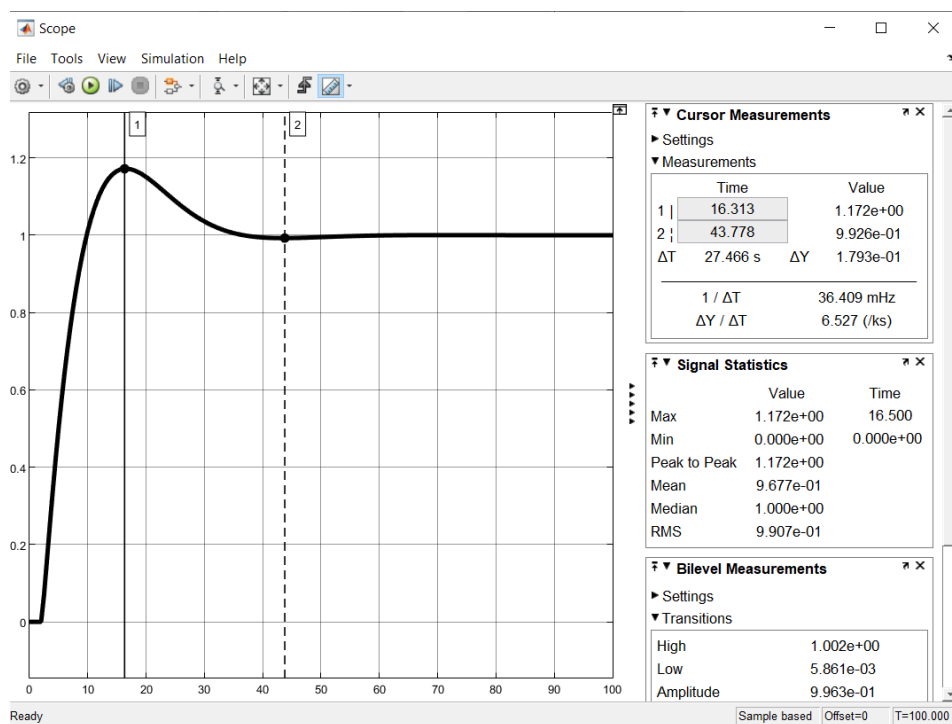


Рисунок 3.8 – Построение переходного процесса в АСР

По графику переходного процесса определяем величины:

$$A_1=0,1720, A_2=0,0074, A_3=0,0010.$$

Прямые оценки качества переходного процесса:

1. Максимальная динамическая ошибка:  $A_1=0,1720$ .

2. Степень затухания переходного процесса:

$$\psi = \frac{A_1 - A_2}{A_1} = \frac{0,1720 - 0,0074}{0,1720} = 0,9570.$$

3. Время регулирования:  $t_p = 28,4$  с.

4. Перерегулирование:  $\sigma = \frac{A_1}{Y(\infty)} \cdot 100 = \frac{0,1720}{1} \cdot 100 = 17,20 \%$ .

5. Статическая ошибка:  $\varepsilon_{ст} = S - Y(\infty) = 1 - 1 = 0$ .

### 3.3 Вывод по разделу Расчет параметров настройки регулятора

В ходе выполнения данного раздела были выполнены задачи по расчету одноконтурной АСР с логическим законом управления. Рассмотрена система регулирования с классическим ПИ-регулятором. Данный регулятор удовлетворяет требованиям по степени затухания ( $\psi$  не менее 0,95). В результате параметрического синтеза системы управления определены оптимальные параметры настройки регулятора ( $k_p=3,7777$ ,  $k_i=0,5129$ ). При найденных параметрах построены переходные процессы. Прямые оценки качества переходного процесса показывают, что найденные параметры настройки отвечают требованиям, предъявляемым к АСР.



# ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
5БМ82	Антонов Дмитрий Владимирович

Школа	ИШЭ	Отделение школы (НОЦ)	И.Н. Бутакова
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Теплоэнергетика и теплотехника

## Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Стоимость материальных ресурсов по средней стоимости по г. Томску Оклады в соответствии с окладами сотрудников НИ ТПУ Общий бюджет проекта - не более 1950 тыс. руб., в том числе ФОТ - не более 650 тыс. руб.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	- 30% премии; - 20% надбавки; - 16% накладные расходы; - 15% коэффициент доп. заработной платы; - 30% районный коэффициент. Интегральный критерий ресурсоэффективности – не ниже 4,5.
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Размер страховых взносов 30%.

## Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ	Анализ конкурентных технических решений FAST-анализ Планирование работ и оценка их выполнения
2. Разработка устава научно-технического проекта	Смета затрат на проект
3. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	– смета затрат на оборудование; – определение трудоемкости выполнения работ.
4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	Определение ресурсной эффективности исследования

## Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Анализ конкурентных технических решений
2. FAST-анализ
3. Календарный план-график проведения НТИ
4. Бюджет затрат НТИ
5. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	16.04.20
--	----------

## Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Спицына Любовь Юрьевна	К.Э.Н.		

## Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ82	Антонов Дмитрий Владимирович		

#### 4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Перспективное научное исследование определяется коммерческой ценностью технического проекта. Оценка коммерческой ценности проекта является важным условием при поиске источников финансов для проведения научного исследования и коммерциализации полученных результатов. Эта оценка является важным фактором для разработчиков, которые должны опираться на существующие перспективы проводимых научных исследований. Благодаря такой оценке инженер может найти партнера для качественного и скорого проведения научного исследования, а также утверждения и коммерциализации результатов.

Коммерческую привлекательность такого исследования определяют не только увеличением технических параметров над подобным проектом, но и как быстро инженер ответит на следующие вопросы - актуальные ли технические решения используются, какая будет цена реализации проекта и его научного исследования, сколько времени потребуется для осуществления разработки проекта и т.п.

В рамках данной магистерской диссертации разрабатывается автоматизированная система подготовки и сжигания топлива в двигательной установке с микро-взрывной фрагментацией капель топлива. Внедрение такой системы позволит минимизировать расходы топлива, повысить динамику процесса горения, поспособствует снижению антропогенных выбросов и повышению полноты его выгорания, улучшит качества и в тоже время удешевит процесс подготовки, распыления и сжигания топлива.

В данный момент современные системы подготовки и сжигания топлива в двигательной установке, да и другие существенно отличающиеся по принципу действия системы, к сожалению, имеют довольно невысокий коэффициент полезного действия. Это обусловлено тем, что большая часть энергии расходуется на нагрев топлива, его испарение и зажигание. Целью

написания данного раздела является расчет экономической эффективности разработки автоматизированной системы подготовки и сжигания топлива в двигательной установке с микро-взрывной фрагментацией капель топлив.

Достижение цели обеспечивается решением следующих задач:

- 1) составление перечня работ, и оценка времени их выполнения;
- 2) составление сметы затрат на проект;
- 3) составление сметы затрат на оборудование и монтажные работы для реализации проекта;
- 4) определение ресурсоэффективности проекта.

При проектирование новой системы или модернизации старой системы с экономической точки зрения важным является определение границ эффективности и бюджета. В рамках данного проекта разрабатываемая система должна соответствовать высоким показателям ресурсоэффективности по основным критериям (помехоустойчивость, безопасность, надежность, энергосбережение, удобство эксплуатации и материалоемкость). Интегральный критерий ресурсоэффективности должен быть не ниже 4,5. Что касается бюджета проекта научно-технических работ по разработке автоматизированной системы подготовки и сжигания топлива в двигательной установке с микро-взрывной фрагментацией капель топлив, то его верхняя граница определена средствами, выделенными на разработку, в виде научного гранта. Максимальный бюджет проекта не должен превышать 1 950 000 рублей.

#### 4.1 Анализ конкурентных технических решений

Разработка и проектирование любой автоматизированной системы предполагает, кроме проведения проектной части, анализ конкурентных технических решений. По своим основным принципам и целям проектирования варианты автоматизированных систем разных производителей идентичны. Однако по техническим и экономическим критериям они будут значительно различаться. Каждый производитель придерживается своих требований при разработке автоматизированных систем. Так, например, одни производители делают акцент на надежность, помехоустойчивость, а другие на дешевизну. Примерами конкурирующих производителей автоматизированных систем для двигательных установок являются HATZ и Vertigo.

В ходе проведения анализа конкурентоспособности технических решений важным является выделение критериев оценки автоматизированных систем двигательных установок (сильные и слабые стороны конкурентных разработок). Данный анализ производится с помощью специальной оценочной карты (таблица 4.1). Точка зрения конкурентов и разработки оценивается по каждому показателю по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Вес показателей составляет 1.

Анализ конкурентных технических решений производится с использованием следующей формулы:

$$K = \sum B_i \cdot \text{Б}_i,$$

где  $K$  – конкурентоспособность научной разработки;  $B_i$  – вес показателя измеряется в долях единицы;  $\text{Б}_i$  – балл  $i$ -го показателя.

Результаты анализа конкурентных технических решений представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Разработка АСУ для Kirloskar	АСУ компании HATZ	АСУ компании Vertigo	$K_1$	$K_2$	$K_3$
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Надёжность	0,25	5	4	4	1,25	1	1
2. Помехоустойчивость	0,15	5	4	4	0,75	0,6	0,6
3. Простота и качество пользовательского интерфейса	0,1	5	5	5	0,5	0,5	0,5
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Стоимость	0,25	5	3	3	1,25	0,75	0,75
2. Длительность изготовления продукта с его последующей поставкой на рынок	0,1	5	4	4	0,5	0,4	0,4
3. Конкурентоспособность продукта	0,1	4	5	5	0,4	0,5	0,5
4. Наличие сертификата качества научной разработки	0,05	5	5	5	0,25	0,25	0,25
ИТОГО	1				4,9	4	4

Анализ конкурентных технических решений показывает, что наиболее перспективным по техническим и экономическим критериям является реализация собственного варианта автоматизированной системы для двигательной установки Kirloskar. Благодаря анализу можно увидеть соответствие сильных и слабых сторон различных производителей. Такой анализ конкурирующих реализаций, которые существуют на рынке, необходимо осуществлять постоянно, так как в условиях рыночной экономики все находится в постоянном движении. Кроме того, анализ помогает вносить коррективы в научные исследования, чтобы обеспечивать конкурентоспособность своего товара.

## 4.2 FAST-анализ

FAST-анализ представляет собой метод, который базируется на том, что затраты, связанные с созданием и использованием любого объекта, выполняющего заданные функции, состоят из необходимых для его изготовления и эксплуатации и дополнительных, функционально неоправданных, излишних затрат. FAST-анализ включает 6 стадий, которые будут описаны ниже.

### 4.2.1 Выбор объекта FAST-анализа

В качестве объекта FAST-анализа в данной работе выступает объект исследования – автоматизированная система подготовки и сжигания топлива в двигательной установке с микро-взрывной фрагментацией капель топлив. Внедрение такой системы позволит минимизировать расходы топлива, повысить динамику процесса горения, поспособствует снижению антропогенных выбросов и повышению полноты его выгорания, улучшит качества и в тоже время удешевит процесс подготовки, распыления и сжигания топлива.

### 4.2.2 Описание главной, основных и вспомогательных функций, выполняемых объектом

В рамках данного раздела объект FAST-анализа анализируется с позиции функционального устройства, определяются его главные, основные и вспомогательные функции. Главная функция представляет собой внешнюю функцию, определяющую назначение, сущность и главную цель создания объекта в целом. Основные и вспомогательные функции отражают внутренние функции объекта. Классификация функций, выполняемых объектом исследования представлена в виде таблицы 4.2.

Таблица 4.2 – Классификация функций, выполняемых объектом исследования

Наименование	Выполняемые функции	Ранг функции		
		Главная	Основная	Вспомогательные
Автоматизированная система	Обеспечивает повышение эффективности управления объектом исследования	X		
Программные средства	Позволяет выполнять комплекс программ или отдельных задач		X	
Аппаратные средства	Режим автоматического управления		X	
Персонал	Режим ручного управления		X	
SCADA-системы	Обеспечивает визуализацию технологического процесса			X
Организационные мероприятия	Направлены на успешное внедрение системы и на безопасное ведение технологического процесса			X

#### 4.2.3 Определение значимости выполняемых функций объектом

В рамках данного раздела для оценки значимости функций воспользуемся методом расстановки приоритетов. В основе данного метода положено расчетно-экспертное определение значимости каждой функции.

На первом этапе строим матрицу смежности функций (таблица 4.3). Функции определены согласно таблице 4.2 в порядке упоминания.

Таблица 4.3 – Матрица смежности функций

	Функция 1	Функция 2	Функция 3	Функция 4	Функция 5	Функция 6
Функция 1	=	>	>	>	>	>
Функция 2	<	=	=	=	>	>
Функция 3	<	=	=	=	>	>
Функция 4	<	=	=	=	>	>
Функция 5	<	<	<	<	=	>
Функция 6	<	<	<	<	<	=

На втором этапе преобразуем матрицу смежности в матрицу количественных соотношений функций (таблица 4.4).

Таблица 4.4 – Матрица количественных соотношений функций

	Функция 1	Функция 2	Функция 3	Функция 4	Функция 5	Функция 6	ИТОГО
Функция 1	1	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	8,5
Функция 2	0,5	1	1	1	1,5	1,5	6,5
Функция 3	0,5	1	1	1	1,5	1,5	6,5
Функция 4	0,5	1	1	1	1,5	1,5	6,5
Функция 5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	1,5	4,5
Функция 6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	3,5
СУММА							36

В рамках третьего этапа определяем значимость функций путем деления балла, полученного по каждой функции, на общую сумму баллов по всем функциям. Так для функции 1 относительная значимость равна  $8,5/36 = 0,24$ , для функции 2 – 0,18; для функции 3 – 0,18; для функции 4 – 0,18; для функции 5 – 0,13; для функции 6 – 0,09.

#### 4.2.4 Анализ стоимости функций, выполняемых объектом исследования

В рамках данного раздела с использованием специальных методов определяем уровень затрат на выполнение каждой функции. Сделаем это с использованием нормативного метода. Соответствующие расчеты функций приведены в таблице 4.5. Данная информация приведена с учетом средних затрат на выполнения функций 1-6.

Таблица 4.5 – Определение стоимости функций, выполняемых объектом исследования

Наименование функции	Стоимость оборудования, руб	Заработная плата, руб	Себестоимость, руб
Функция 1	600 000	300 000	800 000
Функция 2	200 000	0	200 000
Функция 3	300 000	0	300 000
Функция 4	30 000	250 000	280 000
Функция 5	50 000	30 000	80 000
Функция 6	20 000	20 000	40 000



#### 4.2.5 Построение функционально-стоимостной диаграммы объекта и ее анализ

Информация об объекте исследования, собранная в рамках предыдущих стадий, в данном разделе обобщается в виде функционально-стоимостной диаграммы (рисунок 4.1). Построенная функционально-стоимостная диаграмма позволяет выявить диспропорции между важностью (полезностью) функций и затратами на них.

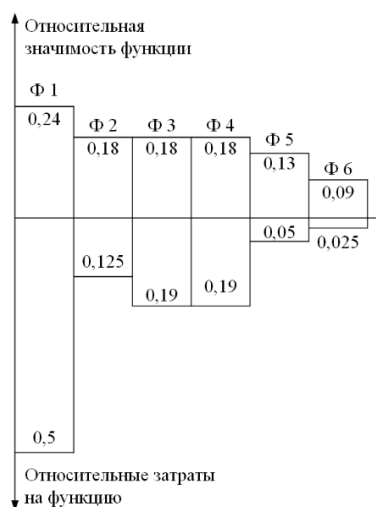


Рисунок 4.1 – Функционально-стоимостная диаграмма

По результатам анализа приведенной выше функционально-стоимостной диаграммы рассогласования между затратами и значимостью функций не обнаружено, поэтому проведение работ по ликвидации диспропорций не требуется.

#### 4.2.6 Оптимизация функций, выполняемых объектом

В качестве конкретных шагов по оптимизации функций, выполняемых объектом, предлагается выполнить следующее: оптимизация технических параметров и параметров надежности; применение новых методов к разработке автоматизированных систем, а также улучшение взаимодействия персонала и оборудования для получения еще более ресурсоэффективной и высокотехнологической разработки.

#### 4.3 Планирование научно-исследовательских работ

Планирование комплекса научно-исследовательских работ осуществляется в следующем порядке:

- определяется порядок работ в рамках технического исследования;
- определяются исполнители каждой работы;
- устанавливается продолжительность работ;
- осуществляется построение графика научных исследований.

Создается рабочая группа, в состав которой входят научный руководитель и инженер (магистрант). На каждый вид запланированных работ устанавливается определенная должность исполнителей.

Составляется список основных видов работ в рамках проведения научного исследования. Производится распределение участников по видам их работ. Последовательность работ и распределение участников по данным видам работ представлены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей при разработке автоматизированной системы подготовки и сжигания топлива в двигательной установке с микро-взрывной фрагментацией капель топлив

Содержание работ	Основные исполнители	Продолжительность выполнения работ в днях
1	2	3
1. Составление технического задания	Научный руководитель Инженер (дипломник)	2
2. Подбор и изучение научно-технической литературы	Научный руководитель Инженер (дипломник)	7
3. Анализ исходной информации и конкретизация темы технического задания	Научный руководитель Инженер (дипломник)	1

Продолжение таблицы 4.7

Содержание работ	Основные исполнители	Продолжительность выполнения работ в днях
1	2	3
4. Обсуждение задач по разработке автоматизированной системы	Научный руководитель Инженер (дипломник)	4
5. Проведение экспериментальных исследований, направленных на изучение эффектов микро-взрывной фрагментации капель топлив	Инженер (дипломник)	20
6. Анализ результатов исследований, направленных на изучение эффектов микро-взрывной фрагментации капель топлив	Инженер (дипломник)	5
7. Системный анализ объекта автоматизации	Инженер (дипломник)	2
8. Разработка структуры КТС автоматизированной системы управления	Инженер (дипломник)	5
9. Разработка функциональной схемы системы управления	Инженер (дипломник)	5
10. Составление опросных листов и выбор технических средств системы управления, составление спецификации	Инженер (дипломник)	5
11. Проектирование схемы внешних проводок	Инженер (дипломник)	5
12. Разработка принципиальной электрической схемы щита управления	Инженер (дипломник)	6

Продолжение таблицы 4.7

Содержание работ	Основные исполнители	Продолжительность выполнения работ в днях
1	2	3
13. Разработка сборочного чертежа щита управления	Инженер (дипломник)	6
14. Разработка фрагментов информационного, математического и программного обеспечений	Инженер (дипломник)	3
15. Разработка мнемосхем SCADA-системы	Инженер (дипломник)	2
16. Оформление схемной документации по ВКР	Инженер (дипломник)	5
17. Составление текстовой документации по ВКР	Инженер (дипломник)	5
18. Расчет параметров настройки регулятора	Инженер (дипломник)	2
19. Написание раздела «Социальная ответственность»	Инженер (дипломник)	6
20. Написание раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	Инженер (дипломник)	6
21. Написание части ВКР на английском языке	Инженер (дипломник)	6
22. Оформление итоговых материалов ВКР: пояснительная записка и графический материал	Инженер (дипломник)	3
23. Подготовка презентации для выступления на защите ВКР	Инженер (дипломник)	2
24. Консультация перед защитой ВКР	Научный руководитель Инженер (дипломник)	7
25. ИТОГО	Научный руководитель	21
	Инженер (дипломник)	120

В итоге, согласно таблице 4.7 НТИ будет реализовываться в 24 основных этапа. Основную часть всех работ будет выполнять инженер (дипломник). Совокупность всех работ (1-24) позволит достигнуть поставленных целей и задач. Планирование работ является неотъемлемой частью любой работы и проекта, благодаря планированию решается проблема рационального распределения трудовых и материальных ресурсов. Время работы руководителя составляет 17,5% от общей длительности проекта.

По данным таблицы 4.7 построен календарный план-график проведения НТИ в виде диаграммы Ганта, представленный на таблице 4.8. Диаграмма Ганта – это один из типов диаграмм, который используется для графического изображения плана, графика работ по какой-либо конкретной работе или проекту. Является одним из методов планирования проектов. Диаграмма Ганта помогает определить продолжительность произведенной работы и позволяет качественно оценить ресурсные составы и взаимосвязи работ.

На основании полученной диаграмм можно сделать вывод о том, что продолжительность работ займёт 12 декад, начиная со третьей декады февраля, заканчивая второй декадой июня. Оценка трудоемкости носит вероятностный характер, вследствие чего реальная продолжительность работ возможно будет, как меньше (при благоприятных обстоятельствах), так и больше (при неблагоприятных обстоятельствах).

По диаграмме Ганта можем заранее оценить показатели рабочего времени для всех исполнителей, а также скорректировать работы для более успешного выполнения проекта.

Длительность выполнения исследования в календарных днях составит 120 дней:

- 120 дней – длительность проведения работ инженером;
- 21 дней – длительность проведения работ научным руководителем.

Таблица 4.8 – Календарный план-график проведения НТИ

№	Вид работ	Исполнитель работ	$T_{ki}$ календ. дней.	Продолжительность выполнения работ											
				Февр.	Март			Апрель			Май			Июнь	
				3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
1	Составление технического задания	Научный руководитель Инженер	2												
2	Подбор и изучение научно-технической литературы	Научный руководитель Инженер	7												
3	Анализ исходной информации и конкретизация темы технического задания	Научный руководитель Инженер	1												
4	Обсуждение задач по разработке автоматизированной системы	Научный руководитель Инженер	4												
5	Проведение экспериментальных исследований, направленных на изучение эффектов микро-взрывной фрагментации капель топлив	Инженер (дипломник)	20												
6	Анализ результатов исследований, направленных на изучение эффектов микро-взрывной фрагментации капель топлив	Инженер (дипломник)	5												
7	Системный анализ объекта автоматизации	Инженер (дипломник)	2												
8	Разработка структуры КТС автоматизированной системы управления	Инженер (дипломник)	5												
9	Разработка функциональной схемы системы управления	Инженер (дипломник)	5												

Продолжение таблицы 4.8

№	Вид работ	Исполнитель работ	$T_{ki}$ календ. дней.	Продолжительность выполнения работ											
				Февр.	Март			Апрель			Май			Июнь	
				3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
10	Составление опросных листов и выбор технических средств системы управления, составление спецификации	Инженер (дипломник)	5						■						
11	Проектирование схемы внешних проводов	Инженер (дипломник)	5						■						
12	Разработка принципиальной электрической схемы щита управления	Инженер (дипломник)	6							■					
13	Разработка сборочного чертежа щита управления	Инженер (дипломник)	6								■				
14	Разработка фрагментов информационного, математического и программного обеспечений	Инженер (дипломник)	3									■			
15	Разработка мнемосхем SCADA-системы	Инженер (дипломник)	2									■			
16	Оформление схемной документации по ВКР	Инженер (дипломник)	5									■			
17	Составление текстовой документации по ВКР	Инженер (дипломник)	5										■		
18	Расчет параметров настройки регулятора	Инженер (дипломник)	2										■		
19	Написание раздела «Социальная ответственность»	Инженер (дипломник)	6											■	

Продолжение таблицы 4.8

№	Вид работ	Исполнитель работ	$T_{ki}$ календ. дней.	Продолжительность выполнения работ											
				Февр.	Март			Апрель			Май			Июнь	
				3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
20	Написание раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	Инженер (дипломник)	6												
21	Написание части ВКР на английском языке	Инженер (дипломник)	6												
22	Оформление итоговых материалов ВКР: пояснительная записка и графический материал	Инженер (дипломник)	3												
23	Подготовка презентации для выступления на защите ВКР	Инженер (дипломник)	2												
24	Консультация перед защитой ВКР	Научный руководитель Инженер (дипломник)	7												



#### 4.4 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

Размер затрат НТИ является основой для определения бюджета данного проекта, который при составлении договора с заказчиком защищается научной организацией в виде нижнего предела затрат на создание научно-технической продукции.

Для формирования затрат исследования используются следующие виды затрат: материальные затраты НТИ; накладные расходы; основная заработная плата участников исследования; дополнительная заработная плата участников исследования; отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления); амортизация.

##### 4.4.1 Расчет материальных затрат НТИ

К материальным затратам относятся: покупные материалы, канцелярские принадлежности, картриджи для МФУ и др.

Таблица 4.9 – Материальные затраты

Наименование	Ед. измерения	Кол-во	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, (З <sub>м</sub> ), руб.
Бумага для печати	пачка	2	550	1100
Мультифоры	штук	15	3	45
Скоросшиватель	штук	2	15	30
Краска для принтера	штук	1	600	600
Ручки	штук	3	30	90
Карандаши	штук	3	10	30
<b>Итого:</b>				<b>1895</b>

Итоговые материальные затраты составили 1895 рублей. Цены на все позиции взяты средние по городу Томску.

#### 4.4.2 Амортизация

Проведем расчёт амортизации отчислений. Амортизация рассчитывается для оборудования свыше 40 тыс. руб.

В зависимости от балансовой стоимости оборудования и согласно действующему законодательству производится расчет амортизационных отчислений с целью определения необходимых денежных средств на полное восстановление. При проектировании используется ноутбук фирмы Asus (модель ASUS Laptop F509FA-BQ752T), стоимость которого составляет  $C_{\text{ОБОР}} = 60000$  руб.

Сумма амортизационных отчислений определяется по следующей формуле:

$$Z_{\text{ам}} = \frac{T_{\text{исп}}}{T_{\text{Г}}} \cdot \frac{1}{T_{\text{сл}}} \cdot C_{\text{ОБОР}} = \frac{120}{365} \cdot \frac{1}{3} \cdot 60000 = 6575 \text{ руб},$$

где  $T_{\text{исп}}$  – количество времени, в которое активно использовалось оборудование = 120 календарных дней;

$T_{\text{Г}}$  – количество времени максимально возможного использования в год = 365 календарных дней;

$T_{\text{сл}}$  – срок службы оборудования = 3 года.

#### 4.4.3 Основная заработная плата исполнителей

Основная заработная плата – это оплата труда всех участников данного исследования (научного руководителя и дипломника).

Расходы на заработную плату определяются, исходя из трудоемкости выполняемых видов работ с учетом действующих окладов и тарифных ставок организации.

Согласно трудовому кодексу на основании отраслевой оплаты труда формируется основная заработная плата. В Томском политехническом университете отраслевая система оплаты труда включает следующий состав заработной платы:

1) основной частью является оклад, определяемый организацией. В Томском политехническом университете оклады всех сотрудников распределены в соответствии с занимаемыми должностями и научными званиями.

2) одним из немаловажных составляющих заработной платы являются стимулирующие выплаты, которые устанавливаются руководителем подразделений за эффективный труд, а также успешное выполнение дополнительных обязанностей и т.д.

3) иные выплаты;

4) районный коэффициент.

Заработная тарифная ставка за месяц работы без учета районного коэффициента составляет:

- научный руководитель (профессор) – 38 800 рублей;
- инженер (дипломник) – 17 000 рублей.

Полная заработная плата включает в себя основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением исследования, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$З_{зп} = З_{осн} + З_{доп},$$

где  $З_{осн}$  – основная заработная плата;

$З_{доп}$  – дополнительная заработная плата (15 % от  $З_{осн}$ ).

Основная заработная плата ( $З_{осн}$ ) руководителя (инженера) рассчитывается по следующей формуле:

$$З_{\text{осн}} = З_{\text{дн}} \cdot T_p,$$

где  $З_{\text{осн}}$  – основная заработная плата одного работника;

$З_{\text{дн}}$  – среднедневная заработная плата работника, руб.;

$T_p$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн..

Среднедневную заработную плату рассчитаем по формуле:

$$З_{\text{дн}} = \frac{З_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}},$$

где  $З_{\text{м}}$  – месячный должностной оклад работника, руб.;

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

- при отпуске в 28 раб. дня  $M=11$  месяцев, 5-дневная неделя;
- при отпуске в 56 раб. дней  $M=10$  месяцев, 6-дневная неделя;
- $F_{\text{д}}$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн.

Месячный должностной оклад работника:

$$З_{\text{м}} = З_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}},$$

где  $З_{\text{тс}}$  – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{\text{пр}}$  – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30% от  $З_{\text{тс}}$ );

$k_{\text{д}}$  – коэффициент доплат и надбавок составляет 0,4;

$k_{\text{р}}$  – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Затраты по дополнительной заработной плате участников исследования учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций.

Рассчитаем дополнительную заработную плату по данной формуле:

$$З_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot З_{\text{осн}},$$

где  $k_{\text{доп}}$  – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,13).

Приведем пример для расчета заработной платы для научного руководителя, работающего по шестидневной рабочей неделе:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}} = 38800 \cdot (1 + 0,3 + 0,4) \cdot 1,3 = 85748 \text{ руб.},$$

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}} = \frac{85748 \cdot 10}{365 - 78 - 56} = 3712 \text{ руб.},$$

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{р}} = 3712 \cdot 21 \approx 77953 \text{ руб.},$$

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}} = 77953 \cdot 0,13 = 10133,9 \text{ руб.}.$$

Пример для расчета заработной платы для дипломника (пятидневная рабочая неделя):

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}} = 17000 \cdot (1 + 0,3 + 0,4) \cdot 1,3 = 37570 \text{ руб.},$$

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}} = \frac{37570 \cdot 11}{365 - 130 - 28} = 1997 \text{ руб.},$$

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{р}} = 1997 \cdot 120 = 239640 \text{ руб.},$$

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}} = 239640 \cdot 0,13 = 31153,2 \text{ руб.}.$$

Результаты расчета заработной платы научного руководителя и дипломника приведены в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	$Z_{\text{тс}}$ , руб.	$k_{\text{пр}}$	$k_{\text{д}}$	$k_{\text{р}}$	$Z_{\text{м}}$ , руб	$Z_{\text{дн}}$ , руб.	$T_{\text{р}}$ , раб. дн.	$Z_{\text{осн}}$ , руб.	$k_{\text{доп}}$	$Z_{\text{доп}}$ , руб.	Итого, руб
Научный руководитель	38800	0,3	0,4	1,3	85748	3712	21	77953	0,13	10133,9	88086,9
Дипломник	17000	0,3	0,4	1,3	37570	1997	120	239640	0,13	31153,2	270793,2

В результате были определены ставки у исполнителей и посчитана основная заработная плата у научного руководителя и дипломника. Итоговая основная зарплата вышла больше у инженера, поскольку ее определение зависело от количества рабочих дней за выполнением проекта.

#### 4.4.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

В этом разделе отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Определяем величину отчислений во внебюджетные фонды опираясь из следующей формулы:

$$З_{внеб} = k_{внеб} \cdot (З_{осн} + З_{доп}),$$

где  $k_{внеб}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

На 2018 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%, а пониженная ставка на научную деятельность – 27,1%.

Таблица 4.11 – Отчисления во внебюджетные фонды

	Руководитель	Дипломник
Основная заработная плата, руб.	77953	239640
Дополнительная заработная плата, руб.	10133,9	31153,2
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,271	
Итого отчисления во внебюджетные фонды:	23871,6	73385,0

В данном разделе определены итоговые отчисления во внебюджетные фонды всех исполнителей.

#### 4.4.5 Накладные расходы

С помощью накладных расходов организации учитывают прочие затраты, которые не попали в предыдущие статьи расходов. Например, оплата электроэнергии, интернета, ксерокопирование материалов исследования и т.д.

Величина накладных расходов определяется по следующей формуле:

$$Z_{\text{накл}} = (\text{сумма статей } 1 \div 5) \cdot k_{\text{нр}} = (Z_{\text{мат}} + Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}} + Z_{\text{внеб}} + Z_{\text{ам}}) \cdot 0,16 = \\ = (1895 + 317593 + 41287,1 + 97256,6 + 6575) \cdot 0,16 = 74337 \text{ руб.}$$

В итоге накладные расходы составляют 74337 рублей.

#### 4.4.6 Формирование затрат научно-исследовательского проекта

Бюджет затрат проекта формируется на основе рассчитанной величины затрат научно-исследовательской работы (проекта). При составлении договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку необходимой продукции.

Таблица 4.12 – Бюджет затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб.	В % к итогу
1. Материальные затраты НТИ	1895	0,35
2. Затраты по основной заработной плате	317593	58,9
3. Затраты по дополнительной заработной плате	41287,1	7,7
4. Отчисления во внебюджетные фонды	97256,6	18
5. Амортизация	6575	1,22
6. Накладные расходы	74337	13,83
<b>Бюджет затрат НТИ</b>	<b>538943,8</b>	<b>100</b>

Бюджет всех затрат НТИ составляет 538943,8 рублей. Самый большой процент бюджета составляет основная заработная плата – 317593 рублей.

#### 4.5 Ресурсоэффективность

Ресурсоэффективность научного исследования определяется с использованием интегрального критерия ресурсоэффективности:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i,$$

где  $I_{pi}$  – интегральный показатель ресурсоэффективности;

$a_i$  – весовой коэффициент проекта;

$b_i$  – бальная оценка проекта, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания.

Расчеты интегрального показателя ресурсоэффективности приведены в таблице 4.13.

Таблица 4.13 – Сравнительная оценка характеристик проекта

Критерии	Весовой коэффициент	Бальная оценка разработки
1. Помехоустойчивость	0,10	5
2. Безопасность	0,25	5
3. Надежность	0,25	5
4. Энергосбережение	0,2	5
5. Удобство эксплуатации и использования	0,10	4
6. Материалоемкость	0,10	4
<b>Итого:</b>	<b>1,00</b>	<b>4,8</b>

Рассчитываем показатель ресурсоэффективности:

$$I_p = 0,1 \cdot 5 + 0,25 \cdot 5 + 0,25 \cdot 5 + 0,2 \cdot 5 + 0,1 \cdot 4 + 0,1 \cdot 4 = 4,8.$$



#### 4.6 Вывод по разделу Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

В рамках данного раздела были решены следующие задачи: составлен перечень работ и произведена оценка времени их выполнения; составлена смета затрат на проект; составлена смета затрат на оборудование и монтажные работы для реализации проекта; определена ресурсоэффективность проекта.

Интегральный критерий ресурсоэффективности имеет высокий показатель (4,8 из 5), что говорит об эффективности использования проекта. Исследования выполнялись исполнителями: научным руководителем (21 дней) и дипломником (120 дней). На исследование потрачено 538943,8 рублей. На основе всех результатов НТИ можно считать успешным.

Внедрение эффектов микро-взрывной фрагментации топлив в двигательной установке позволит минимизировать расходы топлива, повысить динамику процесса горения, поспособствует снижению антропогенных выбросов и т.д.

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

<b>Группа</b>		<b>ФИО</b>	
5БМ82		Антонов Дмитрий Владимирович	
<b>Школа</b>	<b>ИШЭ</b>	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>	<b>И.Н. Бутакова</b>
<b>Уровень образования</b>	Магистратура	<b>Направление/специальность</b>	Теплоэнергетика и теплотехника

Тема ВКР:

<b>Автоматизированная система подготовки и сжигания топлива в двигательной установке с микро-взрывной фрагментацией капель топлив</b>	
<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
1. Характеристика объекта исследования и области его применения	Объектом исследования в данной работе является автоматизированная система подготовки и сжигания топлива в двигательной установке с микро-взрывной фрагментацией капель топлив
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b> 1.1. Специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства. 1.2. Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	– ГОСТ 12.0.003-2015; – ТК РФ N 197-ФЗ; – Конституция РФ.
<b>2. Профессиональная социальная безопасность:</b> 2.1. Анализ вредных и опасных факторов, которые может создать объект исследования. 2.2. Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть при проведении исследований. 2.3. Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов.	– отклонение показателей микроклимата; – превышение уровня шума; – нарушение естественного света; – недостаточная освещенность; – опасность поражений эл. током; – повышенная температура воздуха; – подвижные части производственного оборудования либо движущиеся машины и механизмы; – вещества, обладающие свойствами химического воздействия на организм человека.
<b>3. Экологическая безопасность:</b> 3.1. Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду. 3.2. Анализ «жизненного цикла» объекта исследования. 3.3. Обоснование мероприятий по защите окружающей среды.	– потенциальным негативным воздействием на окружающую среду является воздействие вредных выбросов (CO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub> и т.д.) при работе оборудования.
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b> 4.1. Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований. 4.2. Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть при исследовании объекта. 4.3. Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС.	– возможные ЧС – поражение электрическим током, возгорание; – наиболее типичная ЧС – возгорание.
<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
<b>16.04.20</b>	

Задание выдал консультант:

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Старший преподаватель	Романова Светлана Владимировна			

Задание принял к исполнению студент:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
5БМ82	Антонов Дмитрий Владимирович		

## 5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

К вопросам социальной ответственности в лабораторных условиях относятся: правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности; профессиональная социальная безопасность; экологическая безопасность и безопасность в чрезвычайных ситуациях.

Охрана труда - система сохранения жизни и здоровья работников в процессе трудовой деятельности, включающая в себя правовые, социально-экономические, организационно-технические, санитарно-гигиенические, лечебно-профилактические, реабилитационные и иные мероприятия. Главной задачей охраны труда является создание условий для безопасной трудовой деятельности человека, т. е, создание таких условий труда, которые исключают воздействия вредных факторов производства на рабочих.

В данной работе была спроектирована автоматизированная система подготовки и сжигания топлива в двигательной установке с микро-взрывной фрагментацией капель топлив. Предполагается, что данная система будет устанавливаться в лаборатории для проведения научных исследований. Для обеспечения работоспособности данной системы необходим оператор, который будет отслеживать расход топлива, контролировать основные параметры (температуру и давление) и производить обслуживание системы. Помещение, в котором будет работать оператор, состоит из двух рабочих мест. Общая площадь помещения составляет не менее 150 квадратных метров. При выполнении этих работ на оператора могут воздействовать следующие вредные факторы: повышенная температура воздуха рабочей зоны; повышенная влажность; повышенная загазованность воздуха; недостаточная освещенность рабочего места; физические перегрузки; воздействие открытого огня.

## 5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Основой правового законодательства является Конституция [74], т. е., законы и правовые акты, принимаемые в РФ, не должны противоречить ей. Существуют принятые нормы в области охраны труда: на первом месте жизнь и здоровье работника, а потом уже результат производственной, интеллектуальной или научной деятельности; единые нормативные требования по охране труда; защита интересов работников, пострадавших в результате несчастных случаев. Действующим нормативом по охране труда является ГОСТ 12.0.004-2015 [75].

### 5.1.1 Специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства

Оператор в лаборатории двигательных установок обязан проходить инструктаж по технике безопасности раз в 3 месяца, так же соблюдать правила пожарной безопасности и не оставлять оборудование без присмотра. Предприятие или высшее учебное заведение, к которому относится лаборатория, должно обеспечить оператора спецодеждой, спец-обувью и другими средствами защиты. Остановка работы двигателя должна проводиться во всех аварийных случаях при превышении установок по температуре и давлению в камере сгорания, системе смазки и охлаждения. В конце работы оператор должен сдать дежурство, сделав отметку в журнале. Также оператору должны выдаваться средства индивидуальной защиты дыхательных путей.

### 5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны

Основным объектом в лаборатории с двигательной установкой является рабочее место, представляющее собой в общем случае пространство, в котором может находиться человек при выполнении рабочего процесса. Рабочее место является основной подсистемой производственного процесса.

Согласно ТК РФ, N 197-ФЗ [76] каждый работник имеет право на охрану труда, в том числе: на рабочее место, защищенное от воздействия вредных или опасных производственных факторов; на возмещение вреда, причиненного увечьем, профессиональным заболеванием либо иным повреждением здоровья, связанным с исполнением им трудовых обязанностей; на обучение безопасным методам и приемам труда за счет работодателя и др.

## 5.2 Профессиональная социальная безопасность

Профессиональная социальная безопасность — система организационных мероприятий и технических средств, предотвращающих или уменьшающих вероятность воздействия на работающих опасных травмирующих факторов, возникающих в рабочей зоне в процессе трудовой деятельности.

К работе с экспериментальным стендом с использованием дизельного ДВС допускаются лица, обученные правилам техники безопасности и изучившие Руководство по эксплуатации.

### 5.2.1 Анализ вредных и опасных факторов

При проведении исследований и дальнейшей разработки проектируемого решения согласно ГОСТ 12.0.003-2015 [77], в таблице 5.1

приведен перечень возможных опасных и вредных факторов. По результатам анализа объекта исследования выделены 7 наиболее типичных вредных и опасных факторов.

Таблица 5.1 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработ ка	Изготовл ение	Эксплуат ация	
1. Отклонение показателей микроклимата	+	+	+	СанПиН 2.2.4.548–96 [78]. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ [79]. Шум. Общие требования безопасности. Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*[80]. Требования к освещению устанавливаются СП 52.13330.2016 [81]
2. Превышение уровня шума		+	+	
3. Отсутствие или недостаток естественного света	+	+	+	
4. Недостаточная освещенность рабочей зоны		+	+	
5. Опасность поражений электрическим током	+	+	+	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ [82]. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.
6. Повышенная температура воздуха		+	+	ГОСТ Р 30331.4-95 [83]. Защита от тепловых воздействий.
7. Подвижные части производственного оборудования		+	+	ГОСТ Р 56257-2014 [84] Характеристика факторов внешнего природного воздействия. Общая классификация
8. Вещества, обладающие свойствами химического воздействия на организм человека			+	ГОСТ 12.1.005-88 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны [85]

По результатам таблицы 5.1 проведен более подробный анализ выделенных восьми возможных вредных и опасных факторов с обоснованием мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов.

**Отклонение показателей микроклимата.** Находясь на рабочем месте в помещении лаборатории человек подвержен влиянию определённых метеоусловий, или микроклимату рабочих помещений. Окружающая среда влияет на тепловое состояние организма. Основными параметрами микроклимата являются действующими на организм человека температура, влажность и скорость движения воздуха, а также температура окружающих поверхностей [84].

При работе с двигательной установкой персонал в основном будет задействован работой с ПК. Работа на ПК в офисном помещении относится к классу легких работ с энергозатратами 150 ккал/час, т.е. к классу работ Ib. Для данного типа работ допустимые величины микроклиматы должны обеспечиваться при следующих условиях: перепад температуры воздуха по высоте должен быть не более 3 °С; перепад температуры воздуха по горизонтали, а также ее изменения в течение смены не должны превышать 4 °С. Оптимальная величина относительной влажности составляет 40 – 60 %. Движение воздуха в помещениях является важным фактором, влияющим на тепловое самочувствие человека. Скорость движения воздуха не должна превышать 0,05 м/с.

Согласно СанПиН 2.2.4.548-96 [78] оптимальные параметры микроклимата должны соответствовать данным таблицы 5.2:

Таблица 5.2 – Нормативные параметры микроклимата

Период года	Влажность, %	Температура, °С	Скорость движения воздуха, м/с
Тёплый	60... 40	22... 24	менее 0,1
Холодный	60...40	21... 23	менее 0,1

В таблице 5.3 приведены допустимые величины показателей микроклимата на рабочих местах. В нашем помещении температура зимой колеблется от плюс 20 °С до плюс 22 °С, а летом от плюс 22 °С до плюс 24 °С. Влажность воздуха 60 %, скорость движения воздуха – 0,05 метров в секунду.

Таблица 5.3 – Допустимые величины показателей микроклимата на рабочих местах

Период года	Энергозатраты, Вт	Температура воздуха, °С		Отн. влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с	
		ниже нормы	выше нормы		ниже оптимальных величин, не более	выше оптимальных величин, не более **
Холодный	Iб (140...174)	19,0...20,9	23,1...24,0	15...75	0,1	0,2
Теплый	Iб (140...174)	20,0...21,9	24,1...28,0	15...75 *	0,1	0,3

**Примечание:** \* При температурах воздуха 25° С и выше максимальные величины относительной влажности воздуха должны приниматься в соответствии со специальными требованиями; \*\* При температурах воздуха 26...28° С скорость движения воздуха в теплый период года должна приниматься в соответствии со специальными требованиями

Параметры микроклимата регулируются системой центрального отопления и вентиляцией [84]. Также для поддержания нормального микроклимата необходимо ежедневно проводить влажную уборку и проветривание помещения, а также поддерживать определённый уровень температуры. Согласно, приведённым выше данным, данное помещение удовлетворяет условиям микроклимата.



**Превышение уровня шума.** Одним из методов уменьшения воздействия шума в лаборатории является снижение или ослабление шума в его источниках – генераторы, электрические машины, вентиляторы, двигатели. Ненормальный повышенный шум, создаваемый электрическими машинами и двигателями, часто бывает по причине неплотных соединений элементов. Своевременное устранение этих причин позволяет снизить уровень шума. В качестве индивидуальных средств защиты от шума используют специальные наушники, вкладыши в ушную раковину, противошумные каски, защитное действие которых основано на изоляции и поглощения шума. Также при наличии шума необходимо использовать материалы, имеющие хорошие звукопоглощающие свойства (применять звукоизоляцию). Стены могут быть покрыты звукопоглощающим материалом. В таблице 5.4 приведены допустимые уровни шума (ГОСТ 12.1.003-2014 [79]).

Таблица 5.4 – Допустимые уровни шума (ГОСТ 12.1.003-2014 [79])

Рабочие места	Уровни звукового давления (ДБ) в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								Уровни звука и эквивалентные уровни звука, по дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
ОРУ	99	92	86	83	80	78	76	74	85

**Отсутствие или недостаток естественного света и недостаточная освещенность рабочей зоны.** Рациональное освещение имеет большое значение в процессе эксплуатации двигательной установки в лабораторных условиях. Освещение должно быть таким, чтобы работающий персонал мог без напряжения зрения выполнять свою работу. Неудовлетворительное освещение может искажать информацию, а также утомляет зрение и вызывает утомление всего организма в целом. Применяют два вида освещения:

естественное и искусственное. При недостаточном естественном освещении помещения необходимо использовать искусственные источники света. Так как неудовлетворительная освещённость, как говорилось ранее, ухудшает зрение, вызывает общее утомление и даже может явиться причиной травматизма.

Для искусственного освещения применяют электрические люминесцентные лампы. Для участков, где требуемая освещенность, превышает 3 лк (СНиП 23.05-95 [80]) необходимо предусмотреть общее локализованное освещение. Это выключатели, генераторы, указатели масла и т.д. Общее локализованное освещение следует осуществлять осветительными приборами, устанавливаемыми на порталах, конструкциях и мачтах равномерного освещения. В качестве осветительных приборов применяют газоразрядные лампы. В таблице 5.5 приведены нормы освещенности участков лаборатории с двигательной установкой [80].

Таблица 5.5 – Нормы освещенности открытых участков лаборатории с двигательной установкой [80]

Освещаемые объекты	Средняя освещенность $E_{\text{ср}}$ , лк, не менее
Лаборатории органической и неорганической химии, термические, физические, спектрографические, стилометрические, фотометрические, микроскопные, рентгеноструктурного анализа, механические и радиоизмерительные, электронных устройств, препаратормские.	400

**Опасность поражений электрическим током.** Наибольшую опасность в помещении лаборатории может представлять поражение человека электрическим током вследствие замыкания электрической цепи через тело человека, т. е. при прикосновении человека к сети не менее чем в двух точках. В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека

электрическим током увеличивается или уменьшается. «Правила устройства электроустановок» [86] делят все помещения на помещения с повышенной опасностью, особо опасные помещения, помещения без повышенной опасности. Согласно ГОСТ 12.1.013-78. ССБТ помещение лаборатории с двигательной установкой можно классифицировать как помещение с повышенной опасностью поражения человека электрическим током [82].

Поражение человека электрическим током может произойти в следующих случаях: при прикосновении к токоведущим частям во время ремонта; при однофазном (однополюсном) прикосновении неизолированного от земли человека к неизолированным токоведущим частям электроустановок, находящихся под напряжением; при прикосновении к нетоковедущим частям, находящимся под напряжением, то есть в случае нарушения изоляции; при соприкосновении с полом и стенами, оказавшимися под напряжением.

Меры обеспечения безопасности эксплуатации электроустановок [82]: каждый работающий проходит вводный инструктаж на рабочем месте и подписывается в том, что он ознакомлен с инструкцией по технике безопасности; отключение напряжения с токоведущих частей, на которых должна быть проведена работа, и принятие мер, в результате которых становится невозможна подача напряжения к месту работы; проверка отсутствия напряжения на участке работ и наложение на токоведущие части временного заземления; вывешивание плакатов, указывающих место работы; пользователю не разрешается разбирать оборудование, работать в верхней одежде.

Безопасность при работе с электроустановками обеспечивается применением различных технических и организационных мер. Для обеспечения безопасности применяются технические средства защиты от поражения электрическим током, такие как изоляция токопроводящих частей (проводов); установка оградительных устройств; предупредительная

сигнализация и блокировки; защитное заземление; зануление; защитное отключение.

Для участка персональных компьютеров наиболее приемлемым вариантом является защитное заземление, т. к. корпуса компьютеров и периферии обычно выполнены из токопроводящих материалов, а также имеются специальные клеммы для подключения заземления. Все электрооборудование, расположенное на рабочем месте, включая компьютер, было заземлено через нулевой провод.

**Повышенная температура воздуха.** Во время работы с двигательной установкой некоторые части оборудования сильно нагреваются, особенно части корпуса двигателя. Неосторожное обращение с нагретым оборудованием может привести к ожогам. Согласно ГОСТ Р 30331.4-95 [83], мерами предосторожности являются при работе с нагревающимся оборудованием: не прикасайтесь к нагретым частям оборудования во время его работы (или после завершения работы при остывании); соблюдайте осторожность при работе с исследуемыми нагретыми образцами; выполняйте все работы по обслуживанию и чистке оборудования только при полностью отключенном от сети питания оборудовании и после остывания нагретых частей; используйте специальные рукавицы для защиты рук от ожогов и специальную одежду.

**Подвижные части производственного оборудования.** Существует опасность получения травмы подвижными элементами двигательной установки. Перед включением двигательной установки следует убедиться в отсутствии каких-либо препятствий на пути движущихся частей.

Согласно ГОСТ Р 56257-2014 [84], мерами предосторожности являются: при эксплуатации двигателя необходимо соблюдать все общие правила техники безопасности работы с механизмами; запрещается эксплуатация

двигателя при обнаружении неисправностей в работе механических или электрических компонентов. Продолжать работу разрешается только после устранения причин неисправностей специалистами; при эксплуатации необходимо следить за чистотой всех механизмов двигателя, периодически очищать их от пыли и грязи. Обтирочные материалы, которыми очищается модуль, не должны оставлять следов и ворса на протираемых поверхностях.

**Вещества, обладающие свойствами химического воздействия на организм человека.** Двигательная установка с микро-взрывной фрагментацией капель топлив представляет опасность, как и двигательные установки на привычных видах топлив, таких как дизельное топливо. Опасными факторами при использовании дизельного двигателя: является наличие вредных выбросов, как в атмосферу, так и в помещении, где установлен агрегат, а также высокая степень пожарной и взрывной опасности. Для уменьшения количества концентрации выбросов проводят следующие профилактические мероприятия: установка очистительного оборудования для выхлопных газов, герметизация технологических отверстий дизельного двигателя, добавление дополнительных составляющих топлива, способствующих снижению концентраций выбросов. Для уменьшения загазованности в помещении устанавливается вытяжная система. Помещение оборудовано приточно-вытяжной вентиляцией с нижним и верхним отсосом, обеспечивающей равномерный приток свежего воздуха и удаление загрязненного. Приточно-вытяжная вентиляция в помещении работает постоянно.

## 5.3 Экологическая безопасность

По результатам анализа вредных выбросов при работе двигательной установки выявлено, что среди опасных загрязняющих выбросов, выделяющихся при работе двигателя, являются: монооксид углерода  $\text{CO}$ , оксиды азота  $\text{NO}_x$ , оксиды серы  $\text{SO}_x$ .

### 5.3.1 Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду

Выбросы загрязняющих веществ двигательной установки, обусловленные процессами сгорания органического топлива, являются одним из основных источников загрязнения атмосферы. Объемы вредных выбросов связаны с качеством и количеством сжигаемого топлива, полнотой его использования, а также эффективностью в целом работы двигателя.

Наибольшую опасность для биосферы и для здоровья человека представляют двигатели, не имеющие средств очистки от вредных выбросов.

### 5.3.2 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды

Для снижения количества вредных выбросов необходимо контролировать расход воздуха в двигательной установке. Ведь при нехватке окислителя, возникает большой недожог топлива, что приводит к увеличению количества отходов процесса сжигания топливной композиции. А при избытке воздуха образуются оксиды азота. Также важным аспектом является регулирование температуры в камере сгорания, поскольку от данного параметра зависит количество вредных выбросов. Уменьшить количество вредных выбросов возможно путем внедрения в систему управления двигательной установкой управляющих и регулирующих органов по

температуре и расходу воздуха (регуляторы температуры и расхода воздуха). Информация о значениях температуры и расхода воздуха приходит на регуляторы через соответствующие датчики. Также в качестве средств для борьбы с вредными выбросами используются уловители и нейтрализаторы вредных веществ.

## 5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

### 5.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований

В лаборатории с двигательной установкой наибольшую опасность представляет возникновение возгорания. Поскольку, во-первых, топливо необходимо складировать (есть риск его воспламенения), во-вторых, сжигание топлива происходит при высоких температурах в камере сгорания.

При эксплуатации необходимо контролировать состояние канистр с топливом путем внешнего осмотра и измерения температуры в помещении. Признаками самовозгорания являются повышение температуры, наличие пятен утечек топлива. Если появились признаки самовозгорания топлива, то необходимо устранить эти проблемы. Для устранения этих проблем применяются специальные огнетушащие составы для борьбы с воспламенением горючих веществ.

Самой распространенной причиной возникновения пожара в лаборатории с двигательной установкой является нарушение противопожарных правил. Поэтому обслуживающий персонал при работе с двигательной установкой должен эти правила хорошо знать и выполнять. Необходимо периодически проводить мероприятия по технике безопасности.

#### 5.4.2 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС

В качестве мероприятий по предотвращению ЧС были проведены следующие противопожарные мероприятия: помещение было оборудовано: средствами тушения пожара (огнетушителями, ящиком с песком, стендом с противопожарным инвентарем); средствами связи; проверена исправность электрической проводки осветительных приборов и электрооборудования; персонал знает место нахождения средств пожаротушения и средств связи; помнит номера телефонов для сообщения о пожаре; умеет пользоваться средствами пожаротушения.

При невозможности самостоятельно потушить пожар необходимо вызвать пожарную команду, после чего поставить в известность о случившемся инженера по техники безопасности.

Для тушения пожаров в помещении с компьютерами необходимо применять углекислотные и порошковые огнетушители, которые обладают высокой скоростью тушения, большим временем действия, возможностью тушения электроустановок, высокой эффективностью борьбы с огнем. В лаборатории, в которой выполнялась работа, имеется пенный и углекислотный огнетушитель.



## 5.5 Выводы по разделу Социальная ответственность

Как итог проделанной работы по разделу «Социальная ответственность» можно отметить следующее:

- в работе рассмотрены правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности, указаны специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства, а также организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны;
- рассмотрена профессиональная социальная безопасность;
- выявлены и описаны вредные и опасные факторы, возникающие в лаборатории с двигательной установкой;
- указаны методики и средства борьбы с вредными и опасными факторами;
- рассмотрена экологическая безопасность;
- описаны возможные ЧС и меры по их предупреждению и оповещению.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках магистерской диссертации была разработана автоматизированная система подготовки и сжигания топлива в двигательной установке с микро-взрывной фрагментацией капель топлив.

В ходе научных исследований было выявлено, что применение эффектов микро-взрывной фрагментации топлив позволит обеспечить их интенсивное вторичное измельчение до нескольких сотен и даже десятков микрометров. Это приводит к кратному росту площади поверхности испарения и химического реагирования, тем самым снижению инерционности зажигания топливных композиций, повышению полноты их выгорания, минимизации расхода топлива и равномерному распылению топлива в камере сгорания.

Спроектированная система является трехуровневой. Полевой уровень включает датчики измерения температуры, давления, расхода, уровня, концентрации, а также запорную арматуру и исполнительные механизмы. На среднем уровне располагается контроллер фирмы Siemens, на верхнем уровне – АРМ оператора, щит серверный, панель визуализации и принтер.

В ходе выполнения магистерской диссертации разработана проектная документация: схема структурная, схема функциональная, схема принципиальная электрическая щита управления, схема монтажная внешних проводов, сборочный чертеж и общий вид щита управления.

Пояснительная записка к проекту содержит подробное описание основного оборудования, приборов и технических средств автоматизации, а также мнемосхема и алгоритмы управления. При выборе приборов руководствовались каталогами и сайтами производителей.

Также выполнены разделы «Социальная ответственность» и «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение».

### Основные публикации автора работы:

1. **Antonov D.**, Bellettre J., Tarlet D., Massoli P., Vysokomornaya O., Piskunov M. Impact of holder materials on the heating and explosive breakup of two-component droplets // *Energies*. – 2018.
2. **Antonov D.V.**, Piskunov M.V., Strizhak P.A. Breakup and explosion of droplets of two immiscible fluids and emulsions // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2019.
3. **Antonov D.V.**, Kuznetsov G.V., Strizhak P.A., Rybdylova O., Sazhin S.S. Micro-explosion and autoignition of composite fuel/water droplets // *Combustion and Flame*. – 2019.
4. **Antonov D.V.**, Piskunov M.V., Strizhak P.A. Explosive disintegration of two-component drops under intense conductive, convective, and radiant heating // *Applied Thermal Engineering*. – 2019.
5. **Antonov D.V.**, Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Comparison of the characteristics of micro-explosion and ignition of two-fluid water-based droplets, emulsions and suspensions, moving in the high-temperature oxidizer medium // *Acta Astronautica* – 2019.
6. **Antonov D.V.**, Piskunov M.V., Strizhak P.A. Child droplets produced by micro-explosion and puffing of two-component droplets // *Applied Thermal Engineering*. – 2020.
7. **Antonov, D.V.**, Fedorenko, R.M., Kuznetsov, G.V., Strizhak, P.A. Modeling the micro-explosion of miscible and immiscible liquid droplets // *Acta Astronautica*. – 2020.
8. **Antonov, D.**, Piskunov, M., Strizhak, P., Tarlet, D., Bellettre, J. Dispersed phase structure and micro-explosion behavior under different schemes of water-fuel droplets heating // *Fuel*. – 2020.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Плетнев Г.П. Автоматическое управление и защита теплоэнергетических установок электростанций. – М.: Энергия, 1985. – 340 с.
2. Ключев А.С., Товарнов А.Г. Наладка систем автоматического регулирования котлоагрегатов. – М.: Энергия, 1970. -280 с.
3. Андык В.С. Автоматизация технологических процессов на ТЭС. Учебное пособие к практическим занятиям. - Томск: Изд. ТПУ, 1999-84 с.
4. Кац М.Д. Расчет системы автоматического регулирования температуры перегретого пара парогенератора. Методические указания по выполнению курсового проекта по дисциплине "Автоматизация технологических процессов на ТЭС" для студентов специальности 220301 "Автоматизация технологических процессов и производств". – Томск: Изд. ТПУ, 2006. – 38 с.
5. Antonov D.V., Piskunov M.V., Strizhak P.A. Breakup and explosion of droplets of two immiscible fluids and emulsions // International Journal of Thermal Sciences. – 2019.
6. Antonov D.V., Piskunov M.V., Strizhak P.A. Child droplets produced by micro-explosion and puffing of two-component droplets // Applied Thermal Engineering. – 2020.
7. Kumar AR.M., Kannan M., Nataraj G. A study on performance, emission and combustion characteristics of diesel engine powered by nano-emulsion of waste orange peel oil biodiesel // Renewable Energy. – 2020. – Т. 146. – С. 1781-1795.
8. Zeng Z., Sadeghpour A., Ju Y.S. Thermohydraulic characteristics of a multi-string direct-contact heat exchanger // International Journal Heat and Mass Transfer. – 2018. – Т. 126. – С. 536–544.

9. Dalluge D.L., Whitmer L.E., Polin J.P., Choi Y.S., Shanks B.H., Brown R.C. Comparison of direct and indirect contact heat exchange to improve recovery of bio-oil // *Applied Energy*. – 2019. 113346.
10. Romero R.J., Rodríguez-Martínez A. Optimal water purification using low grade waste heat in an absorption heat transformer // *Desalination*. – 2008.
11. Gad H.M., Ibrahim I.A., Abdel-baky M.E., El-samed A.K.A., Farag T.M. Experimental study of diesel fuel atomization performance of air blast atomizer // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2018. – T. 99. – C. 211–218.
12. Watanabe H., Shoji Y., Yamagaki T., Hayashi J., Akamatsu F., Okazaki K. Secondary atomization and spray flame characteristics of carbonated W/O emulsified fuel // *Fuel*. – 2016. – T. 182. – C. 259–265.
13. Ayhan V., Tunca S. Experimental investigation on using emulsified fuels with different biofuel additives in a DI diesel engine for performance and emissions // *Applied Thermal Engineering*. – 2018.
14. Yoon S., Lee S., Kwon H., Lee J., Park S. Effects of the swirl ratio and injector hole number on the combustion and emission characteristics of a light duty diesel engine // *Applied Thermal Engineering*. – 2018. – T. 142. – C. 68–78.
15. Li Y.Z., Ingason H. Model scale tunnel fire tests with automatic sprinkler // *Fire Safety Journal*. – 2013. – T. 61.
16. Liang T., Li R., Li J., Xu Y., Zhong W., Zhao J., Lo S. Extinguishment of hydrocarbon pool fires by ultrafine water mist with ammonium/amidogen compound in an improved cup burner // *Fire and Materials*. – 2018. – T. 42. – C. 889–896.
17. Kuznetsov G.V., Piskunov M.V., Strizhak P.A. How to improve efficiency of using water when extinguishing fires through the explosive breakup of drops in a flame: Laboratory and field tests // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2017. – T. 121.

18. Finotello G., Padding J.T., Buist K.A., Jongsma A., Innings F., Kuipers J.A.M. Droplet collisions of water and milk in a spray with Langevin turbulence dispersion // *International Journal of Multiphase Flow*. – 2019. – C. 154–167.
19. Munnannur A., Reitz R.D. A new predictive model for fragmenting and non-fragmenting binary droplet collisions // *International Journal of Multiphase Flow*. – 2007. – T. 33. – C. 873–896.
20. Negeed E.-S.R., Ishihara N., Tagashira K., Hidaka S., Kohno M., Takata Y. Experimental study on the effect of surface conditions on evaporation of sprayed liquid droplet // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2010. – T. 49. – C. 2250–2271.
21. Breitenbach J., Kissing J., Roisman I.V., Tropea C. Characterization of secondary droplets during thermal atomization regime // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2018. – T. 98. – C. 516–522.
22. Zhang Z., Liu H., Zhang F., Yao M. Numerical study of spray micro-droplet impinging on dry/wet wall // *Applied Thermal Engineering*. – 2016. – T. 95. – C. 1–9.
23. Shraiber A.A., Podvysotsky A.M., Dubrovsky V.V. Deformation and breakup of drops by aerodynamic forces // *Atomization and Sprays*. – 1996. – T. 6. – C. 667–692.
24. Sazhin S.S., Rybdylova O., Crua C., Heikal M., Ismael M.A., Nissar Z., Aziz A.R.B.A. A simple model for puffing/micro-explosions in water-fuel emulsion droplets, // *International Journal Heat and Mass Transfer*. – 2019.
25. Antonov D.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A., Rybdylova O., Sazhin S.S. Micro-explosion and autoignition of composite fuel/water droplets // *Combustion and Flame*. – 2019.
26. Rao D.C.K., Syam S., Karmakar S., Joarder R. Experimental investigations on nucleation, bubble growth, and micro-explosion characteristics during the

- combustion of ethanol/Jet A-1 fuel droplets // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2017.
27. Shen S., Sun K., Che Z., Wang T., Jia M. Puffing and micro-explosion of heated droplets for homogeneous ethanol-propanol-hexadecane fuel and micro-emulsified ethanol-biodiesel-hexadecane fuel // *Applied Thermal Engineering*. – 2020. – T. 165. 114537.
28. Antonov D.V., Piskunov M.V., Strizhak P.A. Explosive disintegration of two-component drops under intense conductive, convective, and radiant heating // *Applied Thermal Engineering*. – 2019.
29. Watanabe H., Harada T., Matsushita Y., Aoki H., Miura T. The characteristics of puffing of the carbonated emulsified fuel // *International Journal Heat and Mass Transfer*. – 2019.
30. Moussa O., Tarlet D., Massoli P., Bellettre J. Parametric study of the micro-explosion occurrence of W/O emulsions // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2018. – T. 133. – C. 90–97.
31. Avulapati M.M., Megaritis T., Xia J., Ganippa L. Experimental understanding on the dynamics of micro-explosion and puffing in ternary emulsion droplets // *Fuel*. – 2019.
32. Mura E., Calabria R., Califano V., Massoli P., Bellettre J. Emulsion droplet micro-explosion: Analysis of two experimental approaches // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2014.
33. Mura E., Josset C., Loubar K., Huchet G., Bellettre J. Effect of dispersed water droplet size in microexplosion phenomenon for water in oil emulsion // *Atomization and Sprays*. – 2010. – T. 20. – C. 791–799.
34. Zeng Y., Lee C.F. Modeling droplet breakup processes under micro-explosion conditions // *Proceedings of the Combustion Institute*. – 2007. – T. 31. – C. 2185–2193.

35. Zhang Y., Huang Y., Huang R., Huang S., Ma Y., Xu S., Wang Z. A new puffing model for a droplet of butanol-hexadecane blends // *Applied Thermal Engineering*. – 2018.
36. Shlegel N., Strizhak P., Tarlet D., Bellettre J. Comparing the integral characteristics of secondary droplet atomization under different situations, *International Communications in Heat and Mass Transfer*. – 2019. – T. 108.
37. Antonov D.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Comparison of the characteristics of micro-explosion and ignition of two-fluid water-based droplets, emulsions and suspensions, moving in the high-temperature oxidizer medium // *Acta Astronautica* – 2019.
38. Volkov R.S., Kuznetsov G.V., Legros J.C., Strizhak P.A. Experimental investigation of consecutive water droplets falling down through high-temperature gas zone // *International Journal Heat and Mass Transfer*. – 2016. – T. 95. – C. 184–197.
39. Glushkov D.O., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Simultaneous ignition of several droplets of coal–water slurry containing petrochemicals in oxidizer flow // *Fuel Processing Technology*. – 2016. – T. 152. – C. 22–33.
40. Antonov D, Bellettre J, Tarlet D, Massoli P, Vysokomornaya O, Piskunov M. Impact of holder materials on the heating and explosive breakup of two-component droplets // *Energies*. – 2018.
41. Ismael M., Heikal M., Aziz A., Syah F., Zainal E., Crua C. The effect of fuel injection equipment on the dispersed phase of water-in-diesel emulsions // *Applied Energy*. – 2018.
42. ГОСТ Р 53638-2009. Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Общие технические условия. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200079269>. – Загл. с экрана.



43. ГОСТ 14228-80. Дизели и газовые двигатели автоматизированные. Классификация по объему автоматизации. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200006926>. – Загл. с экрана.
44. ГОСТ 10511-83. Системы автоматического регулирования частоты вращения (САРЧ) судовых, тепловозных и промышленных дизелей. Общие технические требования. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/gost-10511-83>. – Загл. с экрана.
45. ГОСТ 4.367-85. Система показателей качества продукции (СПКП). Дизели судовые, тепловозные и промышленные. Номенклатура показателей. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200010458>. – Загл. с экрана.
46. ГОСТ Р ИСО 8178-5-2017. Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Измерение выброса продуктов сгорания. Часть 5. Топливо для испытаний. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200157568>. – Загл. с экрана.
47. ГОСТ ISO 8178-4-2013. Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Измерение выброса продуктов сгорания. Часть 4. Испытательные циклы для двигателей различного применения на установившихся режимах. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200110368>. – Загл. с экрана.
48. ГОСТ 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200003320>. – Загл. с экрана.

49. ГОСТ 23170-78. Упаковка для изделий машиностроения. Общие требования. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200000260>. – Загл. с экрана.
50. ГОСТ Р 50648-94. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к магнитному полю промышленной частоты. Технические требования и методы испытаний. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200027352>. – Загл. с экрана.
51. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к наносекундным импульсным помехам. Требования и методы испытаний. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200062134>. – Загл. с экрана.
52. ОТТ-35.240.50-КТН-187-06. Система автоматического регулирования. Общие технические требования. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://niitn.transneft.ru/u/ovp\\_main\\_pdf\\_file/3881/ott-35.240.50-ktn-132-15\\_sr.pdf](https://niitn.transneft.ru/u/ovp_main_pdf_file/3881/ott-35.240.50-ktn-132-15_sr.pdf). – Загл. с экрана. ГОСТ Р 51317.4.4-2007.
53. ГОСТ 27889-88. Системы производственные гибкие. Системы транспортно-складские автоматизированные. [Электронный ресурс]. Параметры. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200022212>. – Загл. с экрана.
54. Денисенко В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. 2009.
55. МИ 2440-97. Методы экспериментального определения и контроля характеристик погрешности измерительных каналов измерительных систем и измерительных комплексов. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://gostrf.com/norma\\_data/46/46099/index.htm](http://gostrf.com/norma_data/46/46099/index.htm). – Загл. с экрана.
56. ГОСТ 23222-88. Характеристики точности выполнения предписанной функции средств автоматизации. Требования к нормированию. Общие методы

- контроля. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200023326>. – Загл. с экрана.
57. Ключев А.С., Глазов Б.В. Проектирование систем автоматизации технологических процессов. Справочное пособие. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 464 с.
58. Волощенко А.В., Медведев В.В. Технологические измерения и приборы. Курсовое проектирование: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – 120 с.
59. ГОСТ 21.403-80. СПДС. Обозначения условные графические в схемах. Оборудование энергетическое. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/gost-21-403-80-spds>. – Загл. с экрана.
60. ГОСТ 2.785-70. Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Обозначения условные графические. Арматура трубопроводная. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200003851>. – Загл. с экрана.
61. ГОСТ 21.208-2013. Система проектной документации для строительства (СПДС). Автоматизация технологических процессов. Обозначения условные приборов и средств автоматизации в схемах. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200108003>. – Загл. с экрана.
62. ГОСТ Р 53674-2009. Арматура трубопроводная. Номенклатура показателей. Опросные листы для проектирования и заказа. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/gost-r-53674-2009>. – Загл. с экрана.
63. ГОСТ 21.110-95. Правила выполнения спецификации. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/gost-21-110-95-spds>. – Загл. с экрана.

64. Метран. Каталог продукции 2018. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://mtn.nt-rt.ru> свободный. – Загл. с экрана.
65. Овен. Каталог продукции. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.owen.ru/catalog> свободный. – Загл. с экрана.
66. Агава. Контрольно-измерительные приборы. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.kb-agava.ru/kontrolno\\_izmeritelnye\\_pribory/](http://www.kb-agava.ru/kontrolno_izmeritelnye_pribory/) свободный. – Загл. с экрана.
67. Умные КИП от АО «Эксист». Каталог. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.eksis.ru/catalog/> свободный. – Загл. с экрана.
68. Система автоматизации S7–300. Данные модулей. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.ste.ru/siemens/pdf/rus/S7\\_300\\_Modul\\_Data\\_p1\\_r.pdf](http://www.ste.ru/siemens/pdf/rus/S7_300_Modul_Data_p1_r.pdf), свободный. – Загл. с экрана.
69. Волошенко А. В., Горбунов Д. Б. Проектирование функциональных схем систем автоматического контроля и регулирования: учебное пособие //Томск: Изд-во ТПУ. – 2008. – 108 с.
70. Новый системный каталог продукции Rittal. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.rittal.com/ru-ru/ebook/ru\\_cat35/index.html](https://www.rittal.com/ru-ru/ebook/ru_cat35/index.html) свободный. – Загл. с экрана.
71. ГОСТ 21.101-97. Система проектной документации для строительства (СПДС). Основные требования к проектной и рабочей документации. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200000429>. – Загл. с экрана.
72. Г. П. Плетнев. Автоматическое управление и защита теплоэнергетических установок электростанций. – М.: Энергия, 1985. – 340 с.
73. Ключев А.С., Товарнов А.Г. Наладка систем автоматического регулирования котлоагрегатов. – М.: Энергия, 1970. -280 с.

74. Баглай М. В. Конституционное право Российской Федерации. – М. : НОРМА-ИНФРА. М, 1999.
75. ГОСТ 12.0.004-2015. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Организация обучения безопасности труда. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200136072>. – Загл. с экрана.
76. РФ Т. К. Трудовой Кодекс Российской Федерации» от 30.12. 2001 № 197-ФЗ //Российская газета. – 2001. – №. 256.
77. ГОСТ 12.0.003-2015. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200136071>. – Загл. с экрана.
78. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/901704046>. – Загл. с экрана.
79. ГОСТ 12.1.003-2014. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200118606>. – Загл. с экрана.
80. СНиП 23-05-95\*. Естественное и искусственное освещение. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/871001026>. – Загл. с экрана.
81. СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/456054197>. – Загл. с экрана.
82. ГОСТ 12.1.038-82. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/5200313>. – Загл. с экрана.

83. ГОСТ 30331.4-95 (МЭК 364-4-42-80). Электроустановки зданий. Часть 4. Требования по обеспечению безопасности. Защита от тепловых воздействий. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200001338>. – Загл. с экрана.
84. ГОСТ Р 56257-2014. Характеристика факторов внешнего природного воздействия. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200118630>. – Загл. с экрана.
85. ГОСТ 12.1.005-88. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200003608>. – Загл. с экрана.
86. Правила устройства электроустановок. Минэнерго СССР, 6-е издание – Энергоатомиздат, 1996. – 640 с.

Приложение A Researches of micro-explosion and puffing effects in two-fluid droplets

Раздел (1)

Researches of micro-explosion and puffing effects in two-fluid droplets

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ82	Антонов Дмитрий Владимирович		

Консультант школы отделения (НОЦ): ИШЭ И.Н. Бутакова

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Стрижак Павел Александрович	д.ф.-м.н., профессор		

Консультант – лингвист отделения (НОЦ) школы: ОИЯ ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Костомаров Петр Иванович	к.фил.н., доцент		

## **A Researches of micro-explosion and puffing effects in two-fluid droplets**

### **A.1 Short introduction**

The micro-explosion of two-fluid droplets under heating contribute to a significant increase in efficiency of a large group of promising technologies, in particular, in the production of heat carriers based on flue gases, vapors, and water droplets, in flame and thermal water purification from unspecified impurities, and in environmentally friendly combustion of fuels, including those prepared from abundant industrial waste containing sewage and service water.

### **A.2 Literature Review**

Article [1] presents the experimental results of combustion and microexplosion of freely falling two-component droplets. The droplets are generated either independently or through the collision or merging of two droplets of fuels. The results of study [1] are showed that microexplosion induced by internal superheating and hence nucleation. *Watanabe H., et al.* [2] illustrates the results of the numerical simulation of spray combustion of emulsified fuel with considering puffing and micro-explosion. A mathematical model is created for puffing. This model is represented the mass change of a droplet during puffing by using the assumption that the mass change was proportional to the evaporation rate. Study [3] shows the results of vaporization, microexplosion and ignition of a single droplet of pyrolysis bio-oil/fuel oil blends. Bio-oil is produced from fast pyrolysis process of wood (lauan). At 500 °C, microexplosion and ignition are occurred for all the bio-oil/fuel blends. Research [4] illustrates the results of the unified secondary breakup model, which incorporates various models in the literature (namely TAB, NLTAB,



DDB and NS) with the use of adjustable coefficients to switch between the models. The model shows good accuracy in the prediction of the temporal evolution of droplet deformation in the three breakup regimes, compared to the experimental data and the CFD simulations.

Evaporation-condensation problems are studied in article [5]. A new phase-change model is developed using user-defined functions (UDFs), based on the volume-of-fluid (VOF) method in the FLUENT code. The new model shows good agreement with the classical analytical or numerical results. Article [6] illustrates the results of evaporation of water and ethanol droplets. This article concludes that the effect of laser excitation on the water droplets is more significant than that on the ethanol droplets. In study [7], effect of emulsified fuels with different biofuel additives on engine performance and emission parameters are investigated experimentally, using a Diesel engine. The optimum emulsified fuel (OEF) content is determined as the blend of B20, DEE5, 10 % W, 2 % surfactant and 63 % diesel fuel. Research [8] discusses the burning characteristics of ABE-diesel blends fuel droplet with different ABE content by the droplet free falling technique under atmospheric pressure. The results [8] show that the addition of ABE increases the burning rate and reduces emissions.

Breakup of single droplets at a hydrodynamic deformation is investigated with using mathematical models in Ansys Fluent [9]. In the study VOF method is used for mathematical modelling. The study discusses deformation modes and rate of a single droplet with different Weber numbers ( $We$ ) and physical properties (density and viscosity) of liquids, namely heavy liquid. The use of emulsified fuels in diesel engines is considered in article [10]. This research presents the characteristic of spray using diesel water emulsified fuel. Spray penetration and distribution are measured experimentally and analyzed with using digital image processing.

*Watanabe H., et al.* [11] presents a mathematical model for predicting the mass of water vapor generated at micro-explosion using the mass and energy conservation equations. The model may be used for a wide range of droplet sizes. Besides, model [11] is suitable for investigating micro-explosion characteristics and understanding micro-explosion process. A set of new mathematical models is proposed for description the flash boiling process [12]. The evolution of the flash boiling is divided into the initial nucleation, the rapid bubble growth, and the slow growth ending with the bubble explosion. Experimental and numerical researches of mechanism of bubble growth are presented in article [13]. A simple experimental system is consisted of suspending a single water droplet on a thermocouple. It is able to measure the droplet temperature. A high speed camera is used to record the bubble growth. Two numerical models are presented to simulate the bubble growth due to pressure drop. The first model is a mass diffusion model. The model is based on the momentum equation of bubble growth coupling with mass diffusion equation phase. The second model is a heat transfer model. The heat transfer model is solved by the momentum equation coupling with the energy conservation equation. The results shows that the numerical bubble radii calculated by the heat transfer model agree well with the experimental measurement [13].

In article [14] the explosion of water-in-oil emulsion droplets in a hot surface is studied using an image capturing approach. The experimental setup consists of a small electrically heated surface, on which the droplets are generated by a syringe during the tests. The results show that the role of the size of the dispersed water droplets has an important influence on the micro-explosion effect.

In my studies [15-20], we focused on determining the threshold (minimum necessary and sufficient) conditions of heterogeneous droplet breakup depending on the concentration of the combustible liquid, gas flow temperature, and heat supply mechanism (from the substrate, heating chamber, or oncoming air flow). In paper

[15], we identified the patterns of typical fragmentation regimes of heterogeneous droplets (puffing and micro-explosion) and explored how the air flow temperature and combustible liquid concentration affects the breakup characteristics and times.

In paper [15] we made the next conclusions and comments. The breakup of a two-component droplet is connected with the overheating of the water–flammable liquid interface above the water boiling temperature (100...120 °C). Liquid surface tension forces suppress the free release of the vapor bubbles formed near the interface. When the vapor pressure in a droplet exceeded the threshold value, the droplet broke up to form a mist, aerosol, or several droplets. When analyzing the heating times of the two-component droplets until breakup, we discovered that the disintegration times of two-component droplets are minimum when holders with a low thermal diffusivity are used ( $a < 10 \text{ mm}^2/\text{s}$ ), and maximum when thermal diffusivity is high ( $a > 80 \text{ mm}^2/\text{s}$ ). In comparison with the results obtained onto a suspending thermocouple junction, under similar conditions of heat source and emulsion properties, the lifetime of the drop is close to the same order of magnitude (2...6 s).

The study [16] presents a software code developed by using Mathematica. This code allows the automatic analysis of breakup consequences of heterogeneous drops. Moreover, we show how statistical data on drop collisions in a sprayed aerosol flow can be collected using this code. For this purpose, we have compared results of manual handling of video with automatic one.

Disintegration of intensely heated liquid droplets often occurs in the mode of puffing and micro-explosion [17]. The efficiency of many gas-vapor droplet technologies can be significantly increased by the rational and controlled use of the effects of dispersion and explosive breakup of the initial droplets. They are often called parent drops. This paper [17] presents the results of experimental studies of fragmentation of boiling-up two-component drops with different composition and

structure: emulsions, suspensions, and non-mixed two-liquid drops. The methods of energy supply to the drop by enhancing the convective and radiative heat transfer, close to the real technologies of fuel ignition, were used. The conditions of free fall of inhomogeneous droplets were considered to exclude the influence of holders on their heating and cooling (heat outflow) during the time spent in the combustion chamber. The characteristics of the main heat and mass transfer processes and phase transformations, providing a regime of intense partial fragmentation, as well as the production of aerosol at the droplet micro-explosion, have been determined. When registering micro-explosion, the times of droplet heating before the breakup, the number and size of child-droplets, the ratio of the evaporation surface area before and after disintegration were controlled. The solid particles in the composition of suspension droplets are shown to significantly intensify the processes of heating, micro-explosive breakup and subsequent ignition. The results of experiments carried out in wide ranges of temperature, velocity and droplet size were considered to apply the obtained data to fuel combustion models at different aero- and gas-dynamic conditions.

The explosive breakup of liquid, emulsion, and slurry droplets enables a several-fold increase of their evaporation surface area [18]. This effect reduces the energy and time required for fuel heating, evaporation, and ignition. It also lowers anthropogenic emissions and provides fuller fuel burnout. However, the conditions and possible regimes of explosive breakup of liquid, slurry and emulsion droplets have yet to be found. Knowledge on such processes is necessary for improving the performance of fuel ignition and combustion as well as thermal and flame liquid treatment. Component mixing and storage may differ. The experiments in this research compare the explosive breakup of heated droplets of two-immiscible fluids (e.g., water/flammable liquid) and water-in-diesel (W/D) emulsions stabilized by mono-ethanol amides of fatty acids. The experiments used the most widespread

combustible liquids and fuels applied in the industry: kerosene, gasoline, diesel, petroleum oils, as well as petroleum. The most valuable findings are as follows: the experimentally established threshold conditions of droplet breakup, two regimes of droplet fragmentation, four outcomes of the parent droplet heating, as well as the number and size of the resulting fuel aerosol droplets. Another important experimental result consists in determining the maximum droplet heating times to explosive breakup corresponding to the equal proportions of water and flammable liquid (or fuel) in a droplet. If one of the components significantly exceeded the other one in proportion, the shortest heating time to droplet breakup was observed. The focus was on comparing the characteristics and parameters of droplets of W/D emulsions and droplets of two immiscible fluids. W/D emulsion droplets breakup to form a fine aerosol, whereas two-component droplets show two breakup regimes: puffing and micro-explosion. The results obtained are important for the development of high-potential gas vapor-droplet technologies to intensify the evaporation of additives and the ignition of fuel compositions.

This paper [19] presents the results of experimental studies of heating, evaporation, surface transformation and micro-explosion of two-component drops under different conditions of energy supply. The studies are carried out for drops consisting of liquid combustible (oil product) and noncombustible (water) components. Two-liquid drops are heated on a substrate (conductive heating), in a stream of heated air (convective heating), and in a muffle furnace (radiant heating). The study demonstrates various modes of heating and disintegration (puffing and micro-explosion) of drops, as well as the consequences in terms of the number and size of the formed droplets in the aerosol cloud. The results show that the micro-explosion of drops during the conductive heating requires much lower temperatures compared to radiant and convective heating. The longest warming-up times of drops prior to disintegration are recorded at the radiant heating due to smaller heat fluxes

as compared to other heating schemes. At the same time, the relative disintegration coefficient of drops is maximum at the radiant heating. As a result, the maximum evaporation surface area of liquid after the disintegration of the initial two-component drop has been found. We have analyzed the vaporization process of liquid combustible (petroleum) and non-combustible (water) components, as well as products of their oxidation.

The development of such technologies requires fundamental understanding of heating, evaporation, boiling, and explosive breakup of one-, two-, and multi-component droplets [20]. The same processes can be used to improve the environmental and energy performance indicators of burning liquid, emulsion, and slurry fuels in combustion chambers of power plants and internal combustion engines. In this paper [20], we present the experimental research into the main heat and mass transfer processes occurring during the heating, evaporation, boiling, and explosive breakup of two- and multi-component droplets in a heated air flow. We identify the principal differences of two dispersion behaviors – puffing and micro-explosion – and indicate the conditions, in which this or that behavior dominates. There is also a transient parameter domain, in which both behaviors can occur. The curves are plotted showing droplet heating times until explosive breakup versus temperature, component concentration, and droplet radii. Finally, we single out the conditions for fragmentation and atomization of two-, three-, and multi-component droplets.

### **A.3 Experimental setup at convective heating**

The experimental technique at convective heating for recording the characteristics and outcomes of micro-explosive fragmentation of two-fluid droplets is similar to the one used in study [15, 18]. The heating system (Fig. A.1) featured

the following elements: a Leister CH 6060 hot-air blower (air velocity 0,5...5 m/s) and a Leister LE 5000 HT air heater (temperature range 293...1273 K) generating the necessary parameters of a high-temperature gas flow (velocity  $U_a$  and temperature  $T_a$ ). The latter was formed in a hollow transparent channel (silica-glass cylinder with an inner diameter of 0,1 m and a wall thickness of 2 mm).

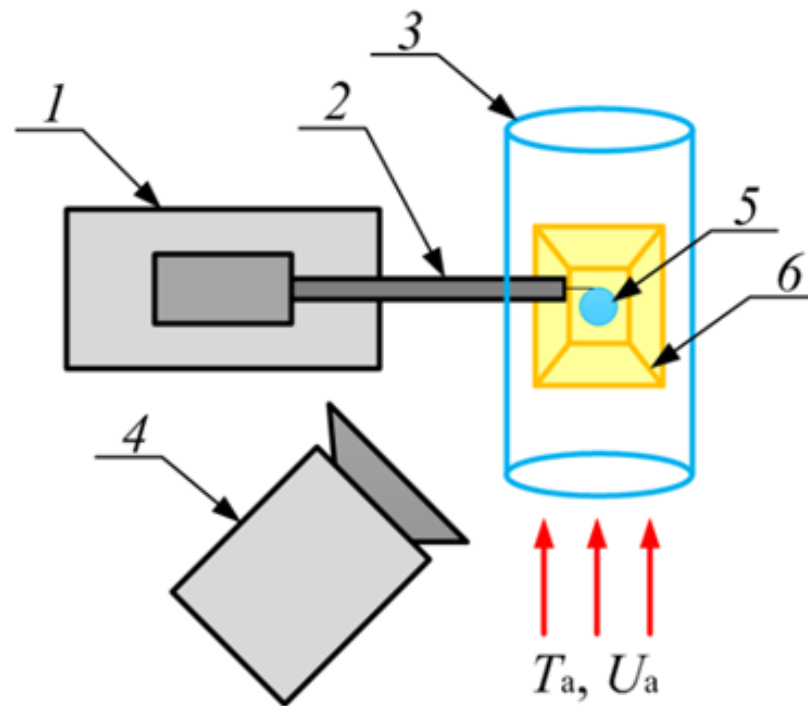


Figure A.1 – Scheme of experimental setup: 1 – positioning mechanism; 2 – holder; 3 – cylindrical channel; 4 – high-speed video camera; 5 – emulsion droplet; 6 – lighting system

High-speed video camera 4 recorded the fast-paced breakup and explosions of two-component droplets. The video frames obtained were saved and processed on the PC using the Phantom Camera Control software. The recording frequency in the experiments was 6000 frames per second.

We used two-liquid emulsions. Their components were first mixed in an ultrasonic tank to provide a homogeneous composition (even component distribution). The initial volume of droplet 5 was produced using an electronic Finnpiptette Novus Thermo dispenser with a volume increment of 0,01  $\mu\text{l}$ . After that, the droplet was suspended on holder 2 and introduced into the heating area limited by cylindrical channel 3.

When processing the experimental results, we recorded the fuel droplet heating time until their micro-explosive breakup. The breakup delay time was the time from the beginning of droplet heating up until the first fragment broke off (puffing) or complete droplet disruption occurred (micro-explosion). Given the video recording frequency, the breakup delay time bias was  $10^{-3}$  s. Further we will show the main experimental findings with confidence intervals showing random errors typical of the series of experiments conducted.

The experiments recorded the number of child droplets, their dimensions, as well as variation in the parent droplet evaporation surface area. We calculated the initial droplet radius  $R_{d0}$  when analyzing the video frames before heating. For that we calculated the four droplet diameters in various sections using a scale factor and then averaged them.  $R_{d0}$  was derived from the average droplet diameter. Given the camera resolution and scale factor, the  $R_d$  calculation was accurate to 0,001 mm.

To calculate the number ( $N_{cd}$ ) and radii ( $r_{cd}$ ) of child droplets, we used two approaches for better accuracy of the experimental findings and for estimating their repeatability in a series of experiments. The measurements did not deviate by more than 5%. This result is crucial since it indicates that any of the two approaches is applicable in such series of experiments. The first approach involved an in-house software code developed in Mathematica. Its main fragments are given in paper [16] with the corresponding clarifications. The experimental video frames were used to determine the moment when parent droplets broke up into child droplets. The frames



were further converted to the tiff image format and imported into Mathematica. The software analyzing the outcomes of two-liquid droplet breakup consisted of two parts: 1 – search of the binarization threshold; 2 – main engine (identifying the elements, calculating their number and size using the scale factor). Each part involved background subtraction. Using the key functions of the main engine (Morphological Binarize and Median filter), we highlighted dark contrast objects (child droplets) against the light background. Each outlined object was represented by a spherical droplet of the same size as the outlined object. Then we calculated the number of liquid fragments and determined the size of the child droplets identified. The child droplet size was measured with an accuracy of at least  $\pm 4\%$ . In addition to our own processing algorithm, we explored the breakup outcomes using a well-known Shadow Photography (SP) technique developed in the Actual Flow software package. The SP technique was based on the shadow image analysis. The videos recorded during the experiments were broken down into frames. Then we selected the frames showing the child droplet generation process. Further image processing consisted of several consecutive actions. At the first stage, we used low-frequency filtration to reduce the noise level. At the second stage, we binarized the images obtained at the previous processing stage (using the Laplacian filter). The third processing stage comprised the search of simply connected domains using the binarized image. As a result, an irregular data field was created for each image containing the coordinates of droplet centers and their radii. At the last stage, we also excluded the particles generated by droplet flares. The size of child droplets was measured by the SP technique with an accuracy of  $\pm 3\%$  relative to the average radii in a series of experiments.

Both approaches included a very important stage of video frame analysis: apart from binarizing the images, we also determined the focal depth of the lens. This made it possible to estimate the number of droplets directly in the focal depth

and beyond it. To consider the child droplets outside the focal depth of the lens, we conducted some more experiments with varying focal depth and came up with adjustment coefficients. The number and size of child droplets were multiplied by these coefficients. In all the experiments, the manual focus was used with the help of the Multi-Function Calibration Target (for Low Magnification Systems). This target allowed us to determine the focal depth of the lens. We placed the target in the recording area and set the focus manually to the zero mark. The distance to the next visible mark on the target was the focal depth. The scale factor was determined in the same way. The grid was chosen so that the scale factor was three times as small as the typical droplet size. No less than 3 pix corresponded to the smallest droplets formed due to the micro-explosive breakup of parent droplets. The recording area varied from 10x10 mm to 15x15 mm.

When processing the experimental results, we recorded the velocities of secondary droplets  $u_{cd}$  using the Particle Tracking Velocimetry (PTV) technique. PTV is meant for calculating instantaneous irregular droplet and particle velocity fields in liquid and gas flows in a selected section by tracking the moving objects. Each child droplet recorded had its own velocity vector. Processing gave us an irregular velocity field. To plot the velocity field by tracking a droplet, we needed two of its images shot one after another within a short period. At the first stage, the droplet location was determined in each of the two images. Thus, we determined the coordinates of each droplet at two points of time, which allowed us to calculate the displacement vector of each particle. Given the inter-frame delay, we derived a velocity vector from the displacement vector. After plotting an irregular velocity field, we filtered the data to exclude false velocity vectors. This technique determined the  $u_{cd}$  with an accuracy of  $\pm 2\%$ .

#### **A.4 References**

1. Wang C.H. et al. On the burning and microexplosion of collision-generated two-component droplets: Miscible fuels // *Combust. Flame*. 2003.
2. Watanabe H. et al. Numerical simulation of emulsified fuel spray combustion with puffing and micro-explosion // *Combust. Flame*. 2010.
3. Hou S.S. et al. Microexplosion and ignition of droplets of fuel oil/bio-oil (derived from lauan wood) blends // *Fuel*. 2013.
4. Stefanitsis D. et al. Improved droplet breakup models for spray applications // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2019.
5. Sun D. et al. Modeling of the evaporation and condensation phase-change problems with fluent // *Numerical Heat Transfer Fundamentals*. 2014.
6. Choo B. et al. Evaporation of droplet with and without laser excitation // *Applied Thermal Engineering*. 2015.
7. Ayhan V. et al. Experimental investigation on using emulsified fuels with different biofuel additives in a DI diesel engine for performance and emissions // *Applied Thermal Engineering*. 2018.
8. Han K. et al. An experimental study of the burning characteristics of acetone-butanol-ethanol and diesel blend droplets // *Energy*. 2017.
9. Thakre S. et al. 3D simulations of the hydrodynamic deformation of melt droplets in a water pool // *Annals of Nuclear Energy*. 2015.
10. Park S. et al. The characteristic of spray using diesel water emulsified fuel in a diesel engine // *Applied Energy*. 2016.

11. Watanabe H. et al. Development of a mathematical model for predicting water vapor mass generated in micro-explosion // *Energy*. 2011.
12. Xi X. et al. A new flash boiling model for single droplet // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017.
13. Liu L. et al. Study on mechanism of bubble growth within a water droplet under rapid depressurization // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018.
14. Mura E. et al. Effect of dispersed water droplet size in microexplosion phenomenon for water in oil emulsion // *Atomization and Sprays*. 2010.
15. Antonov D. et al. Impact of holder materials on the heating and explosive breakup of two-component droplets // *Energies*. 2018.
16. Antonov D. et al. Analysis of statistical data on drop collisions in an aerosol flow during experiments // *EPJ Web Conf*. 2019.
17. Antonov D. et al. Comparison of the characteristics of micro-explosion and ignition of two-fluid water-based droplets, emulsions and suspensions, moving in the high-temperature oxidizer medium // *Acta Astronaut*. 2019.
18. Antonov D. et al. Breakup and explosion of droplets of two immiscible fluids and emulsions // *International Journal of Thermal Science*. 2019.
19. Antonov D. et al. Explosive disintegration of two-component drops under intense conductive, convective, and radiant heating // *Applied Thermal Engineering*. 2019.
20. Antonov D. et al. Heating, evaporation, fragmentation, and breakup of multi-component liquid droplets when heated in air flow // *chemical engineering research and design*. 2019.